

平成 30 年度修士論文

粒子破碎によって生じる細粒分が
砂の非排水せん断挙動に
与える影響

首都大学東京大学院

都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

土質研究室

学籍番号:17885419 氏名:水野光揮

指導教官:吉嶺充俊

研究概要

地盤内でのせん断中に砂粒子が破碎する粒子破碎現象は拘束圧に依存することが知られており、せん断中の粒子破碎は砂の定常状態に重大な影響を与えられていると考えられている。本研究では、初めにせん断中の砂の粒子破碎によって増加した細粒分 FC を調べるために、様々な条件下で実験を行う。そして、試験結果から粒子破碎による細粒分の発生を予測するモデル式を作成し、粒子破碎による細粒分の増加の影響を通常用いられる間隙比の代わりに骨格間隙比を用いて計算を行うことで、砂の粒子破碎による細粒分の増加が、定常状態線に与える影響について調べる。また、Wang ら (2002) によって提案されている砂の構成則で、試験結果の定常状態線を $e = e_0 - \lambda c(p/p_{at})^{\xi}$ のように定式化することで (Li ら (1999)) 砂のせん断挙動を予想することが可能であるため、骨格間隙比による定常状態線を同様に定式化することで、粒子破碎がない場合のせん断挙動を調べることにする。

ある種類の砂の中にも様々な大きさの粒子が分布しており、その粒度分布は砂の種類によって多種多様ではあるが、このうち砂の強度を発するのは中～粗粒の粒子がほとんどであり細粒分はその隙間に漂うばかりでせん断抵抗にはほとんど寄与しないと考えられる。この考え方を基に砂中の細粒分を空隙として扱うように間隙比を補正したものが骨格間隙比 $e_s = (e + FC)/(1 - FC)$ であり、計測された間隙比 e とその砂中に含まれている細粒分 FC がわかれば骨格間隙比を計算することが可能である。骨格間隙比が同じであれば、せん断挙動は同じであることが知られているため、破碎の無い場合のせん断挙動は骨格間隙比によって表されると考えた。

粒子破碎による細粒分発生量を幅広い拘束圧条件とひずみ条件で詳細に調べるために、拘束圧を 100～4000kPa、載荷終了時の軸ひずみ（最大主ひずみ） $\varepsilon_z = 5 \sim 40\%$ の様々な条件で、豊浦砂、飯豊砂（7、6、5、4 号）、岐阜砂（7、6 号）について排水三軸圧縮単調載荷試験を実施した。この試験はせん断中の粒子破碎の影響を調べるために行われたものであり、試料はふるいわけによって予め 106 μm 以下の成分を取り除いた砂を用いた。各号数の飯豊砂の実験では粒径の違いによる破碎性への影響を調べた。また、豊浦砂よりも角張った形状をしている岐阜砂を用いて粒子形状による破碎性の影響をそれぞれ調べた。この試験中、圧密までに生じた細粒分は極めて少量であるため無視することとした。さらに繰り返しせん断試験も行い単調載荷試験との細粒分の発生に関する関連性も調べた。

せん断中の粒子破碎による細粒分発生量 FC と拘束圧やひずみ等様々なパラメータとの相関を調べた結果、FC は鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事（鉛直ひずみ ε_z と鉛直応力 σ'_z の積）と線形関係にあり、FC と W の間の比例係数を B_w とすると

$FC = B_w W$ という式で表すことが可能であることが示された。岐阜砂と豊浦砂の比較から、粒子形状が角張っている方が破碎性は大きくなることが分かった。飯豊砂の結果からは、粒径が大きくなるほど破碎性は小さくなることが分かったが、これは破碎前の粒径に関わらず $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分の発生量で破碎性を評価するという条件による結果であると考えられる。また、単調載荷試験の結果から得られた上記の相関が繰り返し載荷試験でも成立するかについては、せん断仕事と FC 発生量の相関が載荷過程と除荷過程で異なるため、単調載荷試験と同様の関係式で表現をすることは困難であった。

排水条件では粒子破碎が砂の強度に与える影響は小さいが、非排水挙動に与える影響は大きいと考えられる。そこで、既往の定常状態モデルに基づく構成則を用いて、破碎がない場合に比べて破碎がある場合の非排水せん断抵抗の大きさを比較してみることにする。

せん断中に全く粒子破碎しないとすれば常に $FC = 0$ であり、定常状態も含めて常に $e_s = e$ となるので、骨格間隙比 e_s を用いた定常状態線は砂が全く粒子破碎しなかった場合の定常状態線であると言える。三軸圧縮単調載荷試験結果に基づいた定常状態での間隙比 e と拘束圧 p'_{ss} の関係を表した定常状態線と、 $FC = B_w W$ から計算した粒子破碎による細粒分発生量 FC を用いて、既往の非排水せん断試験における定常状態での骨格間隙比 e_s を計算し、改めて骨格間隙比 e_s を用いて粒子破碎しない砂の定常状態線を描き元の定常状態線と比較すると、破碎のないものの方が全体的に上部に位置し、特に 1000kPa より拘束圧が大きくなると骨格間隙比 e_s が間隙比 e にくらべてかなり大きくなっていることが分かった。これは、せん断中の粒子破碎が高压部で特に大きくなるためであると考えられる。

粒子破碎しない砂と粒子破碎する砂の定常状態モデルを既往の構成則に適用し、両者の非排水せん断挙動を比較した。その結果、せん断中に粒子破碎が生じる影響により非排水せん断変形中のせん断抵抗や定常状態での強度は破碎がない場合よりも低下していることが確かめられた。ただし、間隙比が大きくて緩い場合には定常状態での強度の差は小さくなることがわかった。

目次

研究概要	1
------	---

第1章 序論

1.1 研究背景	7
1.2 骨格間隙比	7
1.3 Wang らの豊浦砂の構成則	8
1.4 黄による砂の破砕性に関する研究	10
1.5 研究目的	12

第2章 試料

2.1 豊浦砂	15
2.2 飯豊砂	16
2.3 岐阜砂	20

第3章 三軸せん断試験

3.1 高圧三軸排水せん断試験	25
3.1.1 高圧三軸試験装置	25
3.1.2 使用した用具	31
3.1.3 高圧三軸試験方法	42
3.2 三軸排水せん断試験	48
3.2.1 三軸試験装置	48
3.2.2 使用した用具	57
3.2.3 三軸試験方法	59
3.3 全試験結果	62

第4章 砂の破碎性モデル

4.1	砂の破碎性とひずみの関係	91
4.2	砂の破碎性と応力の関係	92
4.3	砂の破碎性とせん断仕事の関係	93
4.3.1	粒径の異なる砂の破碎性	96
4.3.2	粒子形状の異なる砂の破碎性	98

第5章 粒子破碎の無い定常状態線

5.1	豊浦砂の定常状態線	101
5.2	飯豊砂の定常状態線	102
5.3	岐阜砂の定常状態線	106

第6章 構成則を用いた砂の非排水挙動の予測

6.1	豊浦砂の限界状態モデル	109
6.1.1	豊浦砂のパラメータの決定方法	109
6.2	飯豊砂の限界状態モデル	111
6.2.1	飯豊砂のパラメータの決定方法	111
6.2.2	粒径の異なる砂の限界状態モデル	117
6.3	岐阜砂の限界状態モデル	118
6.3.1	岐阜砂のパラメータの決定方法	118
6.3.2	粒子形状の異なる砂の限界状態モデル	119
6.4	粒子破碎の有無による豊浦砂の非排水強度へ影響	120

第7章 結論

参考文献

第 2 章

試料

2.1 豊浦砂

本研究に使用した豊浦砂の特徴を以下に示す。

豊浦砂は山口県下関市豊浦町大字黒井付近の 2km 四方程度のかかなり限定された場所で産出される天然のシリカサンドに対して、細粒分やごみを取り除くための水洗い、ボイラーによる乾燥、ふるい分けによる粒径 0.3mm 以上の成分の除去の加工を行って製造したものである。

天然砂の特質として、粉砕された人工のものに比べて自然界に存在する形状が保たれており、粒子に丸みがある。この砂は 1996 年まで日本工業規格 (JIS R 5201) によってセメント強さ試験用標準砂に指定されていたもので、1953 年から 1996 年まで社団法人日本セメント協会によって粒度等の品質が検査・管理され、その後も豊浦硅石鉱業株式会社により一貫して採掘や製造がおこなわれているため、長期間にわたり品質のばらつきが非常に小さい。また、粒径幅が非常に狭いので多量の砂を扱っても分級による不均一が生じないので取り扱いが大変に便利である。このためコンクリート分野のみならず地盤工学の分野でも日本における事実上の標準砂として一般に土質力学試験に用いられている。

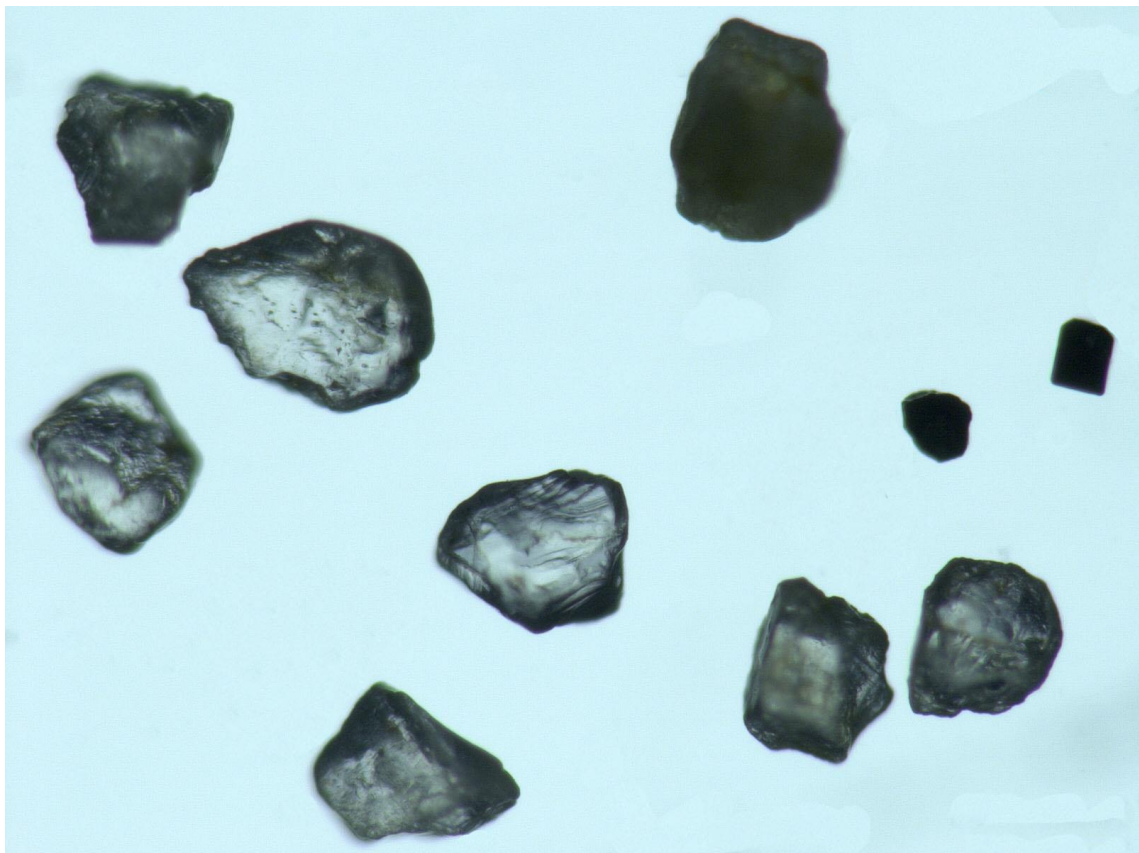


写真 2.1.1 豊浦砂

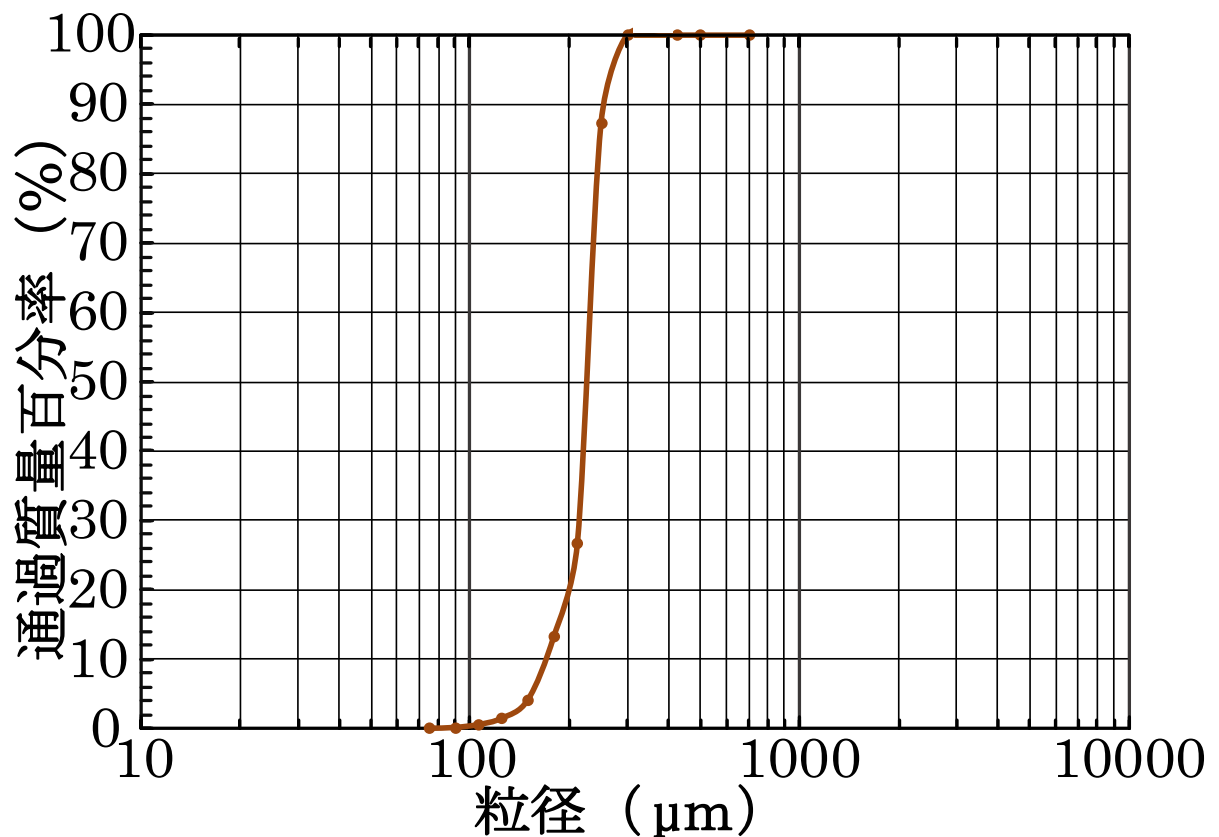


図 2.1.1 豊浦砂の粒形加積曲線

2.2 飯豊砂

本研究に使用した飯豊砂の特徴を以下に示す。

JFE ミネラル株式会社 飯豊鉱業所(山形県西置賜郡飯豊町手ノ子 1211)で採掘されており、一般的な建材店で販売されている珪砂の一種である。

今回使用した飯豊砂は7号(写真 2.2.1)、6号(写真 2.2.2)、5号(写真 2.2.3)、4号(写真 2.2.4)の4種であり、号数が大きいほど粒形が大きい。特徴として7号砂の粒径が豊浦砂とほぼ同様であり、粒子の形も豊浦砂と同様比較的丸い形をしている。

表 2.2.1 および図 2.2.1 は各号数の飯豊砂の最大最小密度、図 2.2.2 は粒形加積曲線である。

表 2.2.1 4～7 飯豊砂の最大最小密度

	4号	5号	6号	7号
$\rho_{\text{dmin}}(\text{g/cm}^3)$	1.521	1.475	1.425	1.363
$\rho_{\text{dmax}}(\text{g/cm}^3)$	1.787	1.779	1.725	1.679

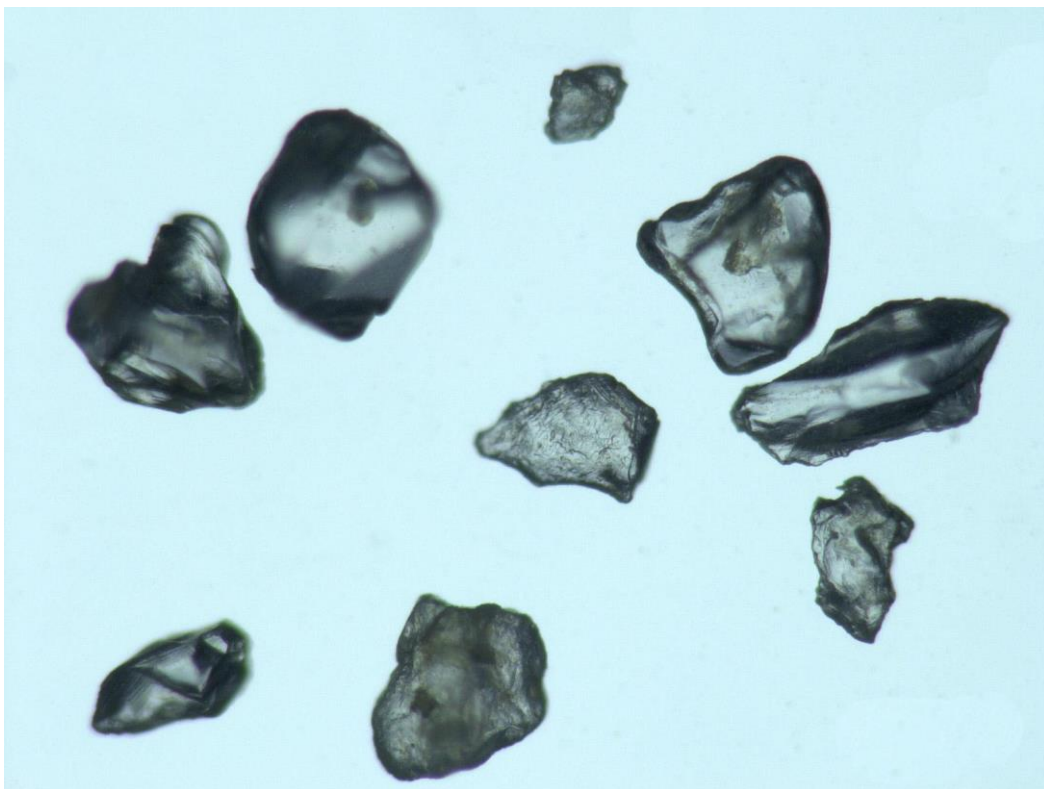


写真 2.2.1 飯豊砂 7 号

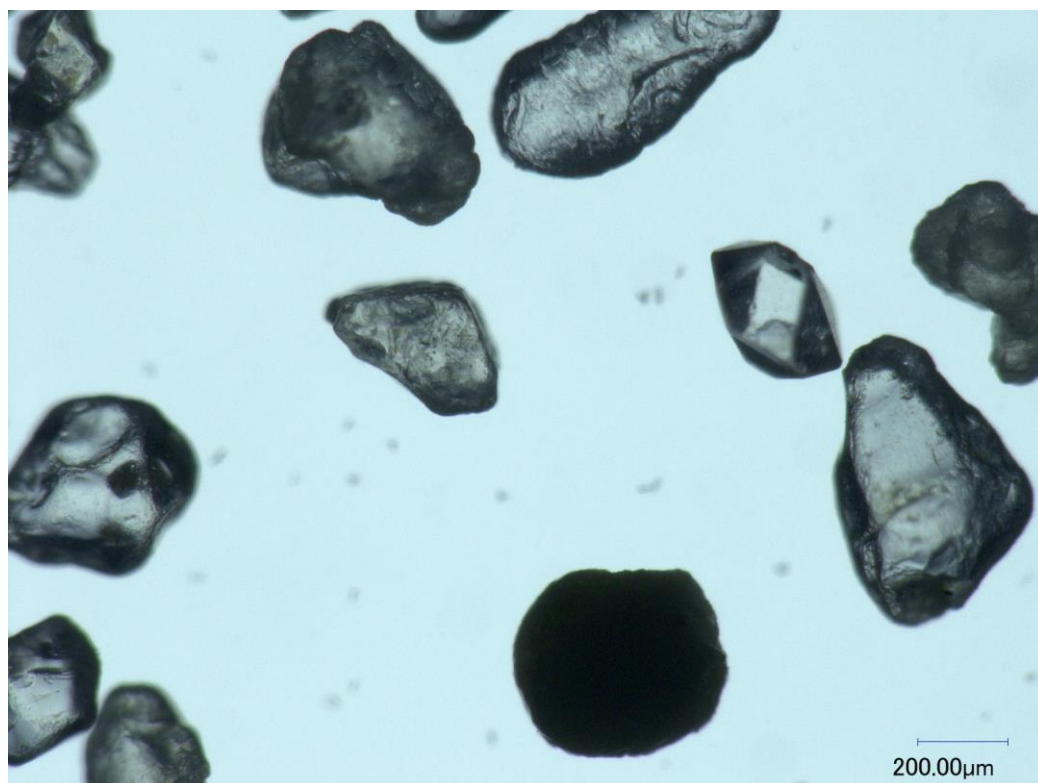


写真 2.2.2 飯豊砂 6 号

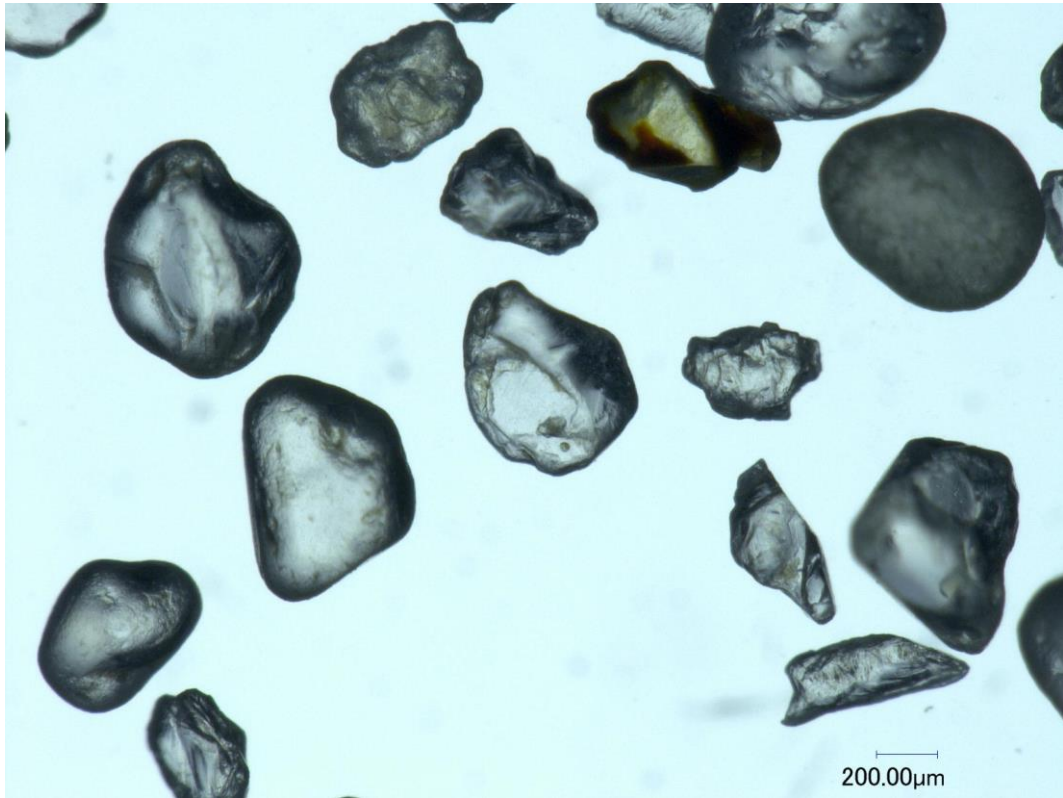


写真 2.2.3 飯豊砂 5 号

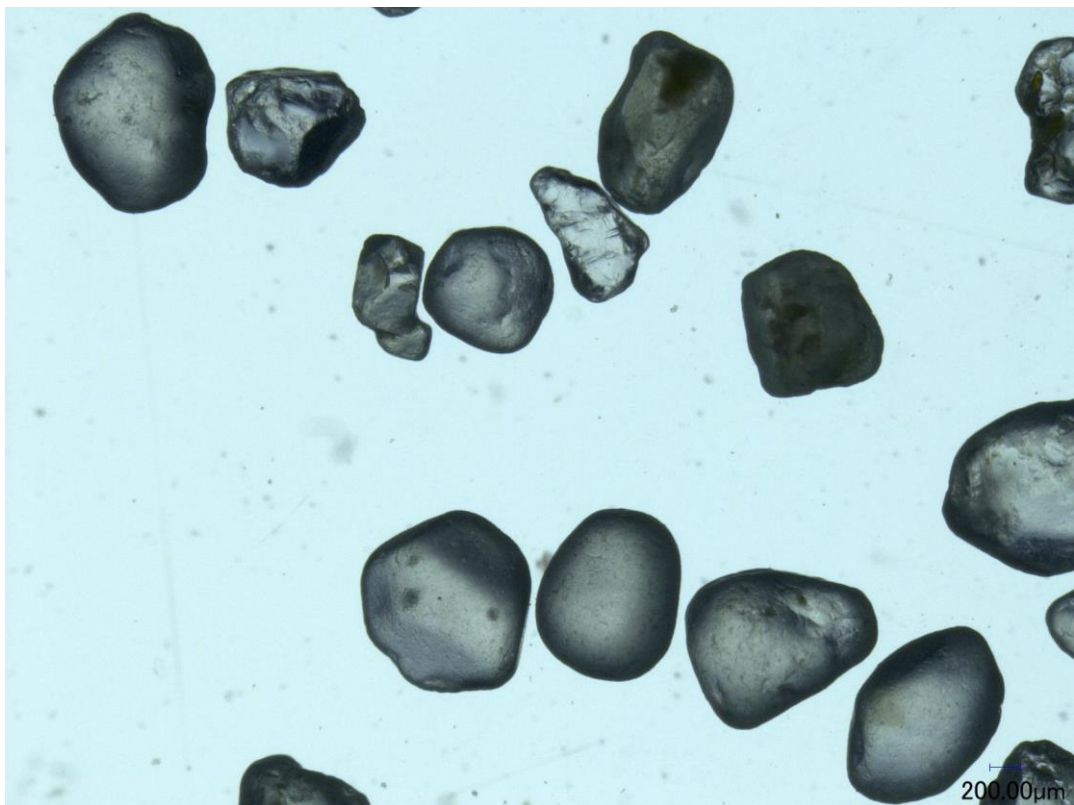


写真 2.2.4 飯豊砂 4 号

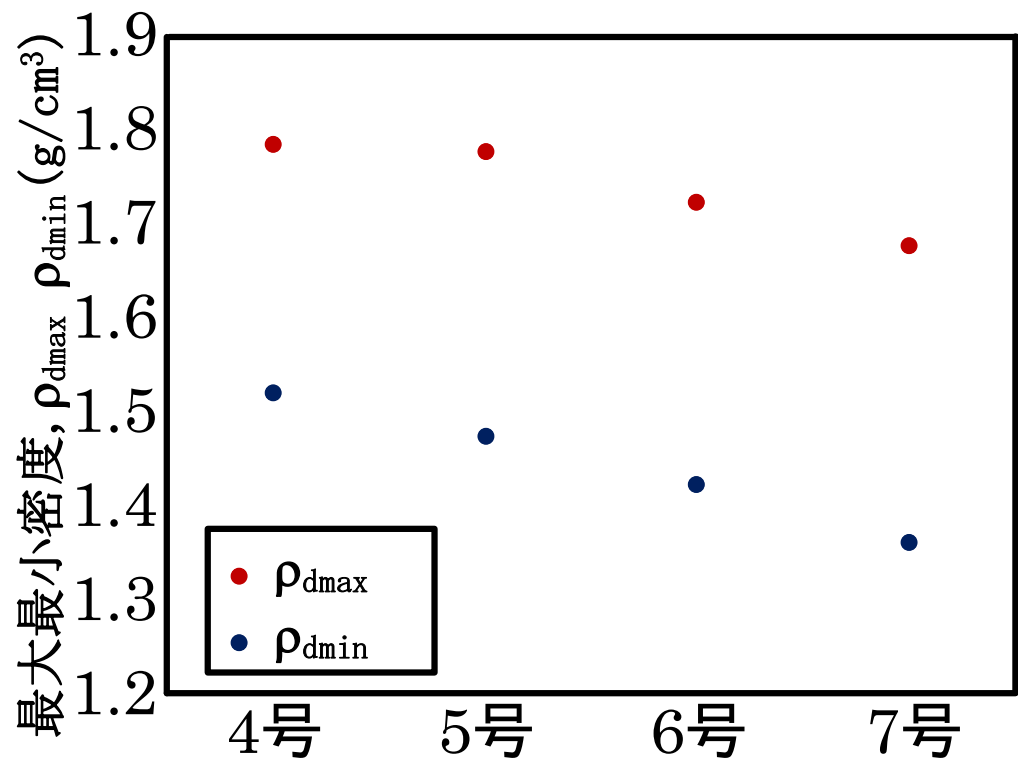


図 2. 2. 1 4～7 号飯豊砂の最大最小密度

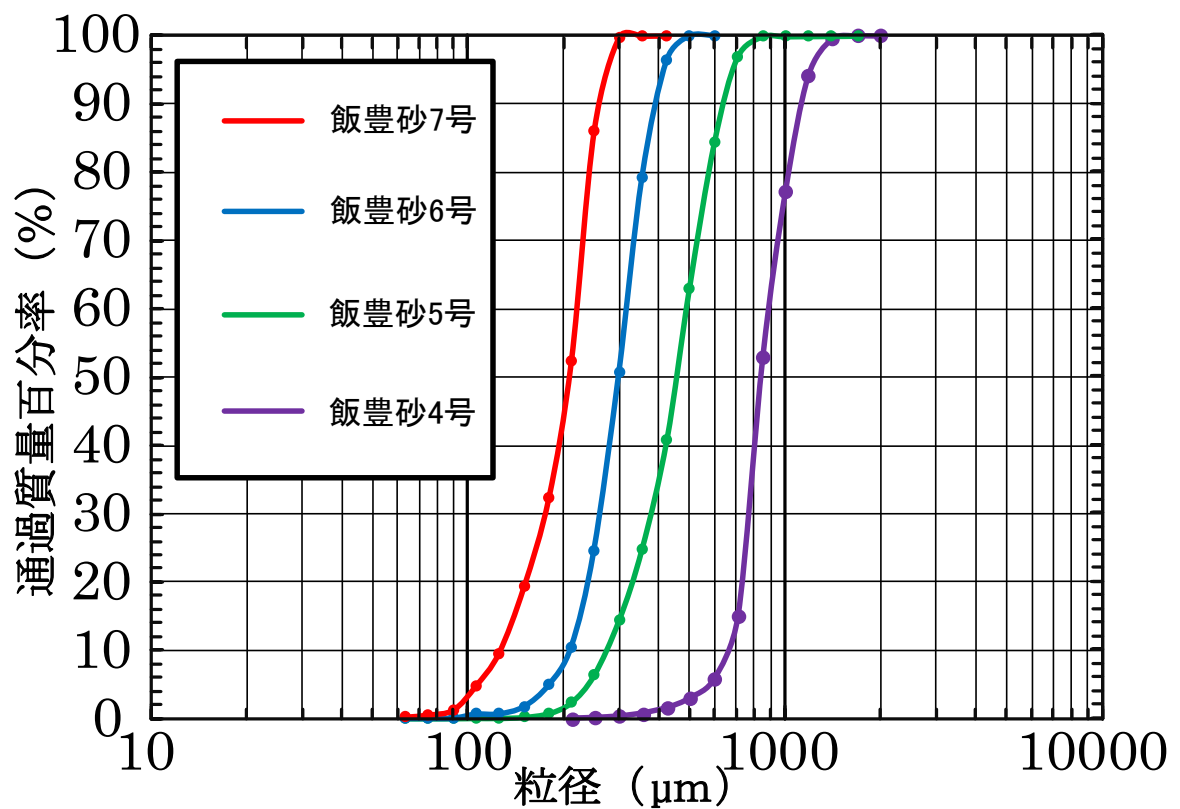


図 2. 2. 2 4～7 号の飯豊砂の粒径加積曲線

2.3 岐阜砂

本研究に使用した岐阜砂の特徴を以下に示す。

購入経路に関して、正確な採掘地はわからないが(株)小高銀砂工場から購入し、(有)竹折砥業所を経由して、瑞浪シリカ協業組合(岐阜県瑞浪市稲津町小里)から出荷されたものを使用した。

今回使用した岐阜砂は7号(写真2.3.1)、6号(写真2.3.2)の2種であり、6、7号砂ともに豊浦砂と粒径が近く、粒子の形状は豊浦砂と比べて角張った形をしている。

表2.3.1および図2.3.1は各号数の岐阜砂の最大最小密度、図2.3.2は粒形加積曲線である。

表 2.3.1 6, 7 号岐阜砂の最大最小密度

	6号	7号
$\rho_{\text{dmin}}(\text{g/cm}^3)$	1.208	1.171
$\rho_{\text{dmax}}(\text{g/cm}^3)$	1.484	1.477

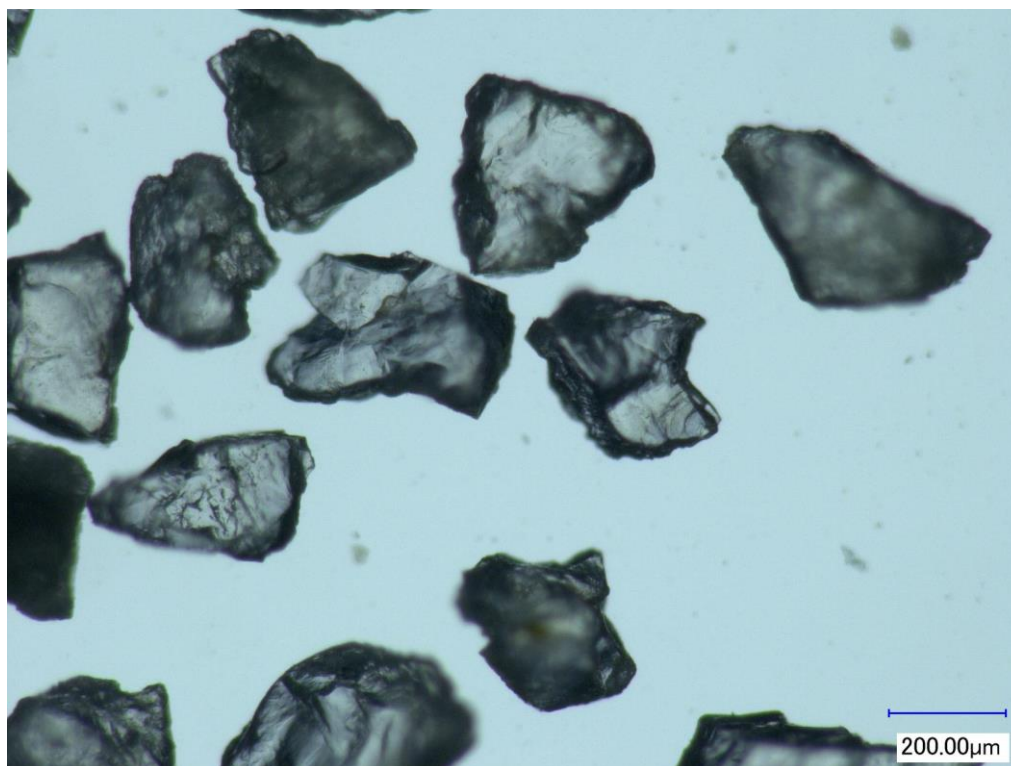


写真 2.3.1 岐阜砂 7 号

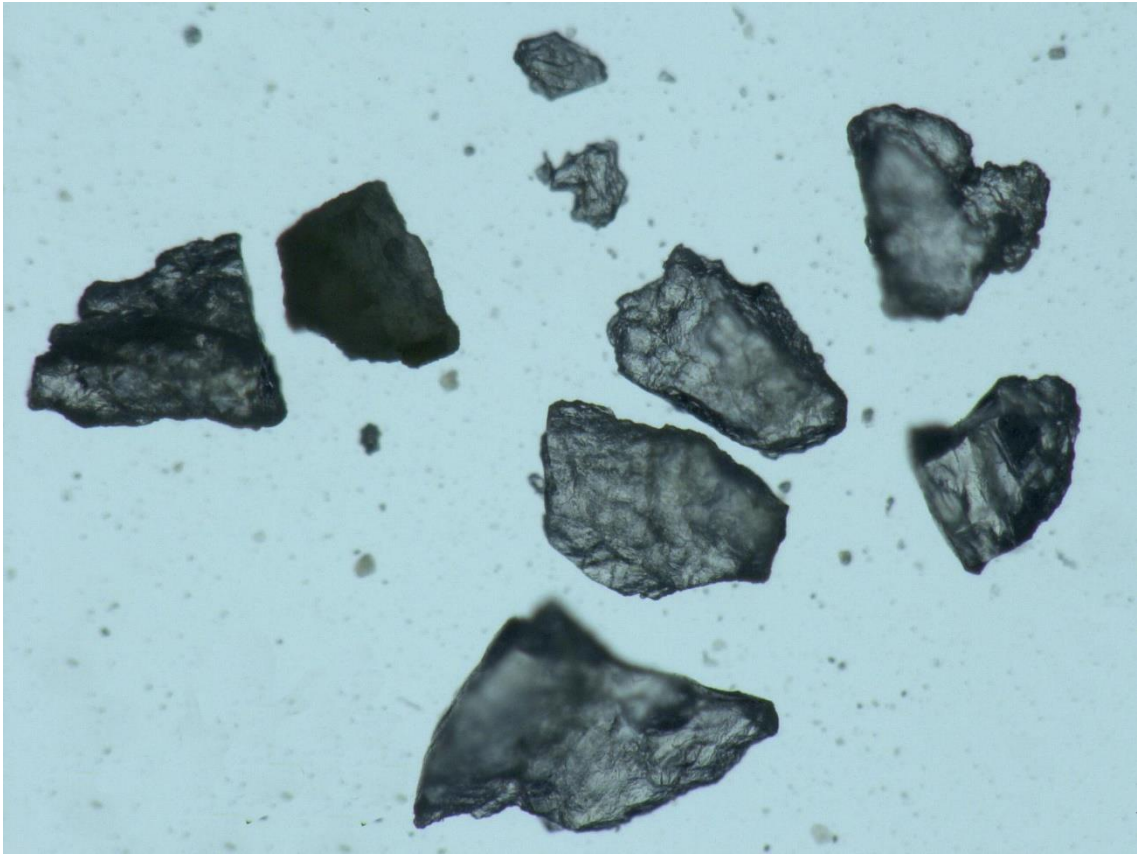


写真 2. 3. 2 岐阜砂 6 号

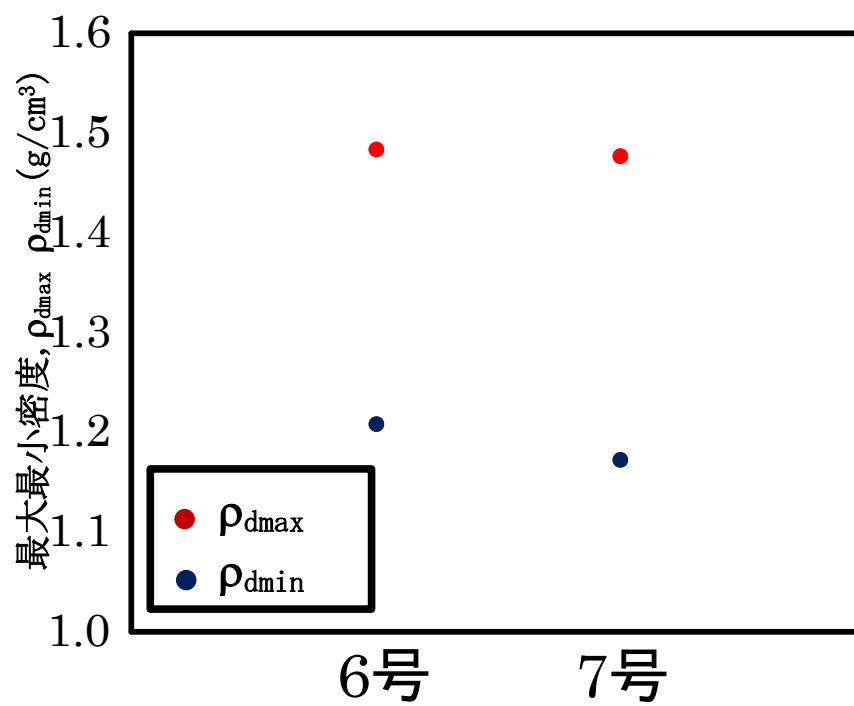


図 2. 3. 1 6, 7 号岐阜砂の最大最小密度

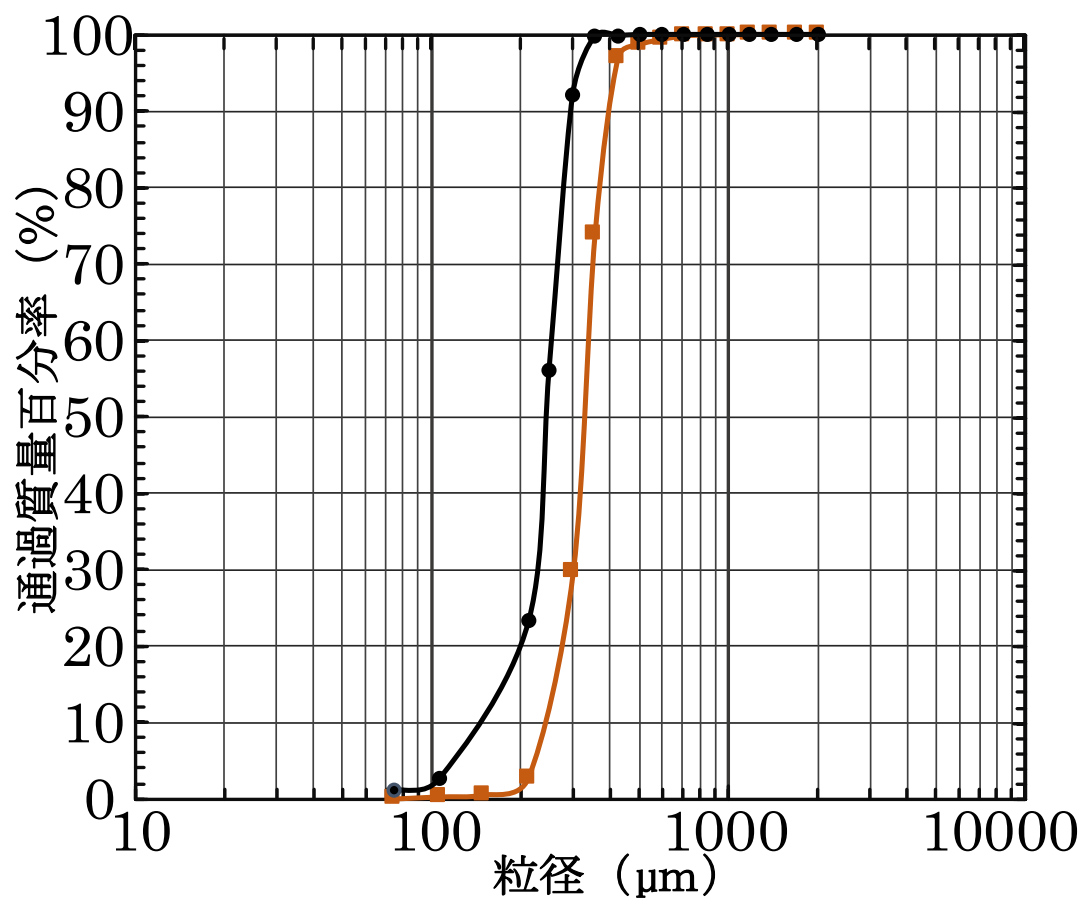


図 2.3.2 6, 7 号岐阜砂の粒径加積曲線

第 2 章

試料

2.1 豊浦砂

本研究に使用した豊浦砂の特徴を以下に示す。

豊浦砂は山口県下関市豊浦町大字黒井付近の 2km 四方程度のかかなり限定された場所で産出される天然のシリカサンドに対して、細粒分やごみを取り除くための水洗い、ボイラーによる乾燥、ふるい分けによる粒径 0.3mm 以上の成分の除去の加工を行って製造したものである。

天然砂の特質として、粉砕された人工のものに比べて自然界に存在する形状が保たれており、粒子に丸みがある。この砂は 1996 年まで日本工業規格(JIS R 5201)によってセメント強さ試験用標準砂に指定されていたもので、1953 年から 1996 年まで社団法人日本セメント協会によって粒度等の品質が検査・管理され、その後も豊浦硅石鉱業株式会社により一貫して採掘や製造がおこなわれているため、長期間にわたり品質のばらつきが非常に小さい。また、粒径幅が非常に狭いので多量の砂を扱っても分級による不均一が生じないので取り扱いが大変に便利である。このためコンクリート分野のみならず地盤工学の分野でも日本における事実上の標準砂として一般に土質力学試験に用いられている。

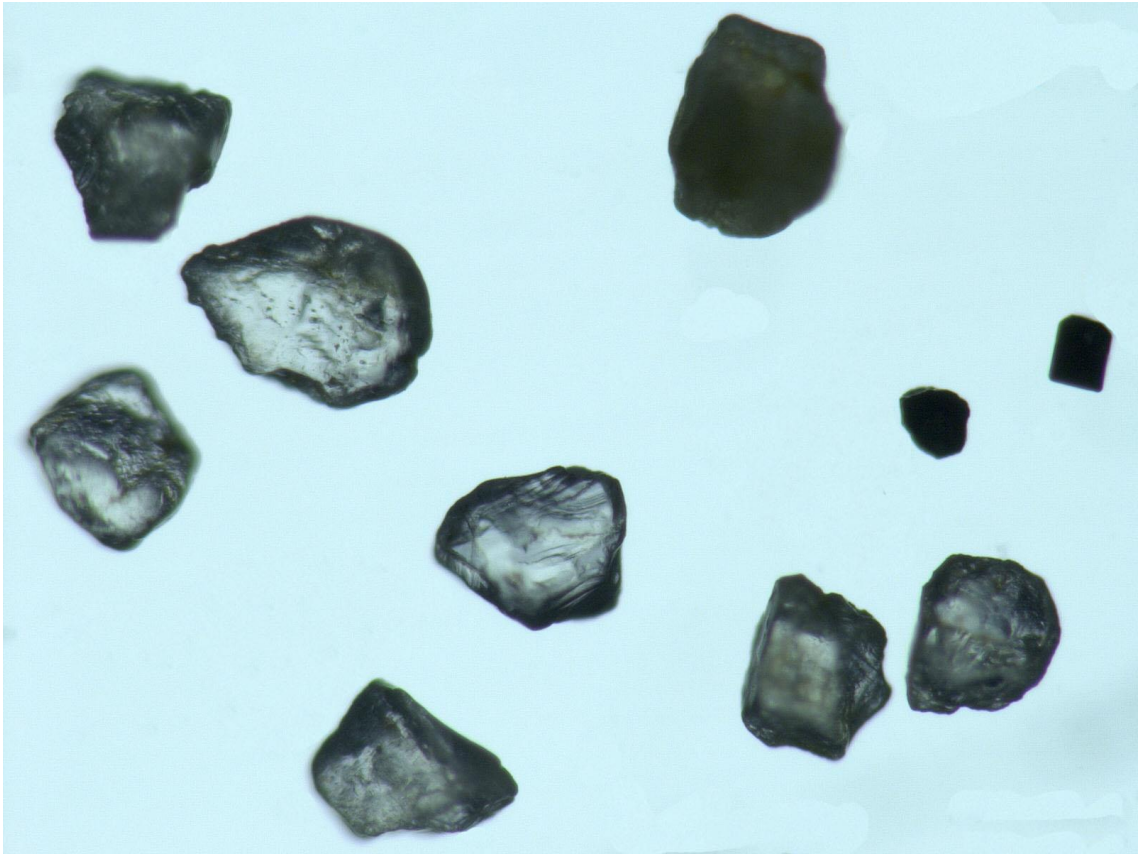


写真 2.1.1 豊浦砂

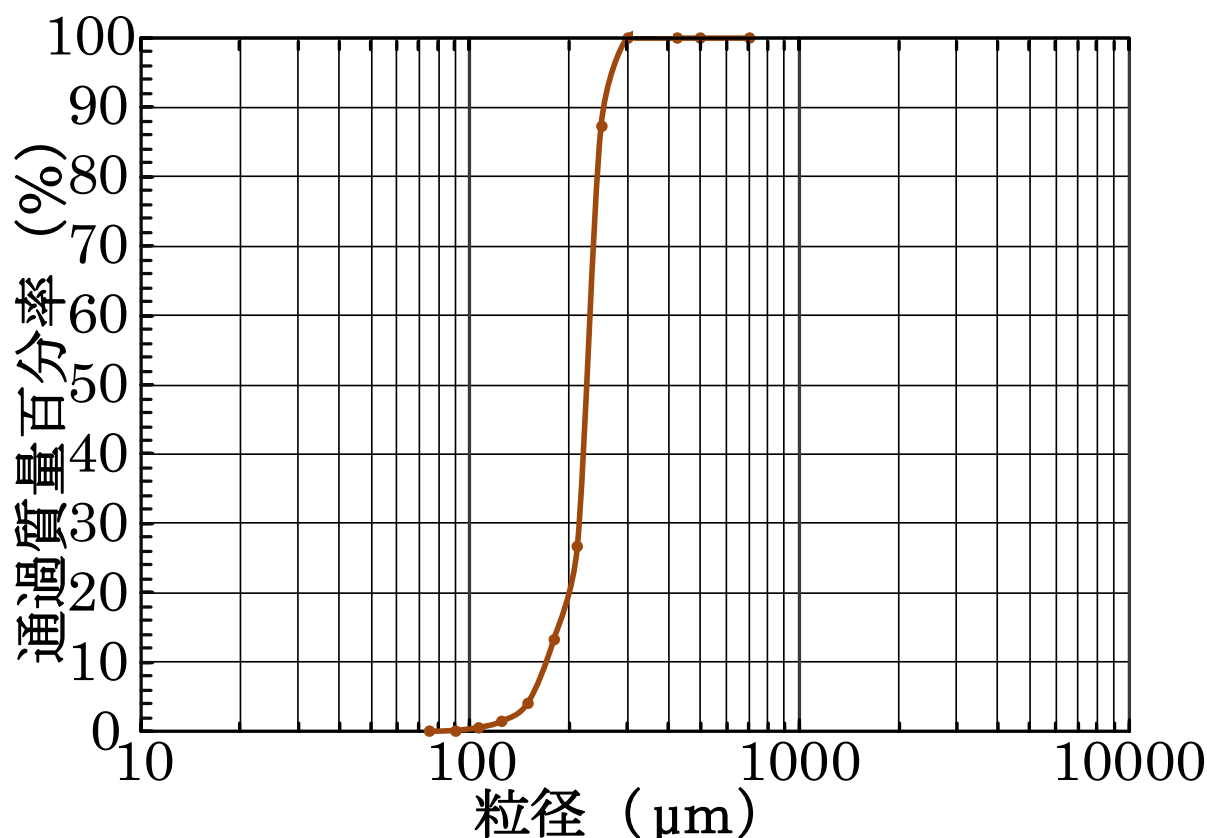


図 2.1.1 豊浦砂の粒形加積曲線

2.2 飯豊砂

本研究に使用した飯豊砂の特徴を以下に示す。

JFE ミネラル株式会社 飯豊鉱業所(山形県西置賜郡飯豊町手ノ子 1211)で採掘されており、一般的な建材店で販売されている珪砂の一種である。

今回使用した飯豊砂は7号(写真 2.2.1)、6号(写真 2.2.2)、5号(写真 2.2.3)、4号(写真 2.2.4)の4種であり、号数が大きいほど粒形が大きい。特徴として7号砂の粒径が豊浦砂とほぼ同様であり、粒子の形も豊浦砂と同様比較的丸い形をしている。

表 2.2.1 および図 2.2.1 は各号数の飯豊砂の最大最小密度、図 2.2.2 は粒形加積曲線である。

表 2.2.1 4～7 飯豊砂の最大最小密度

	4号	5号	6号	7号
$\rho_{\text{dmin}}(\text{g/cm}^3)$	1.521	1.475	1.425	1.363
$\rho_{\text{dmax}}(\text{g/cm}^3)$	1.787	1.779	1.725	1.679

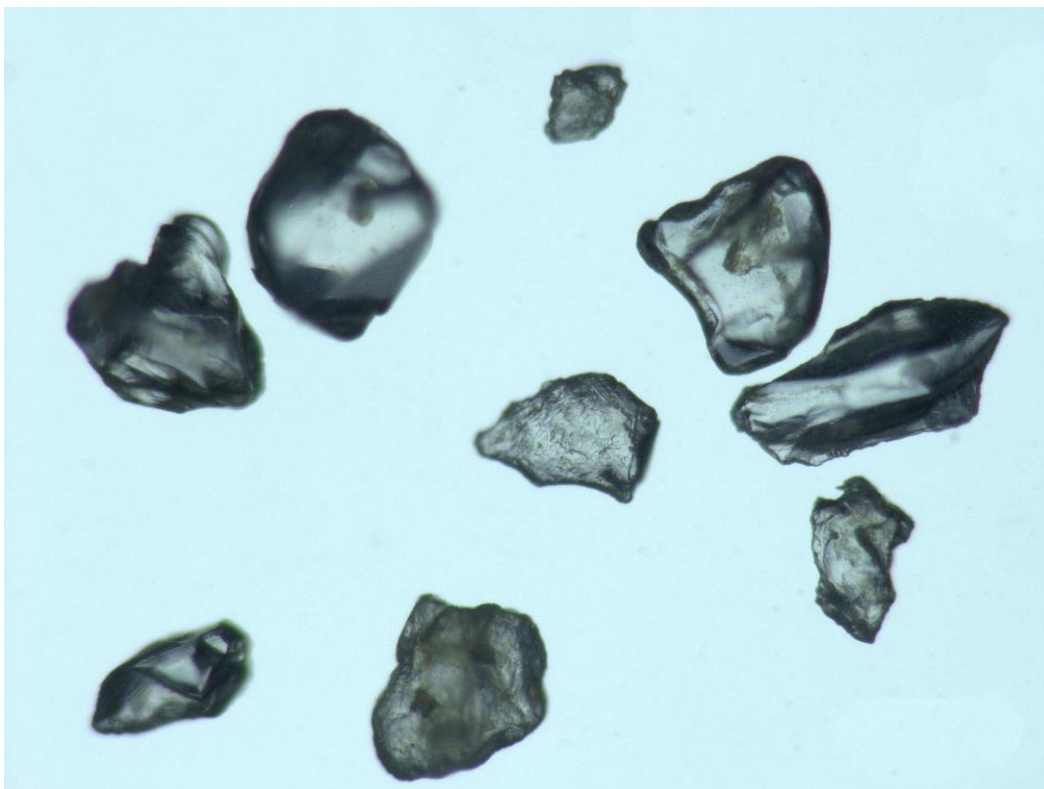


写真 2.2.1 飯豊砂 7 号

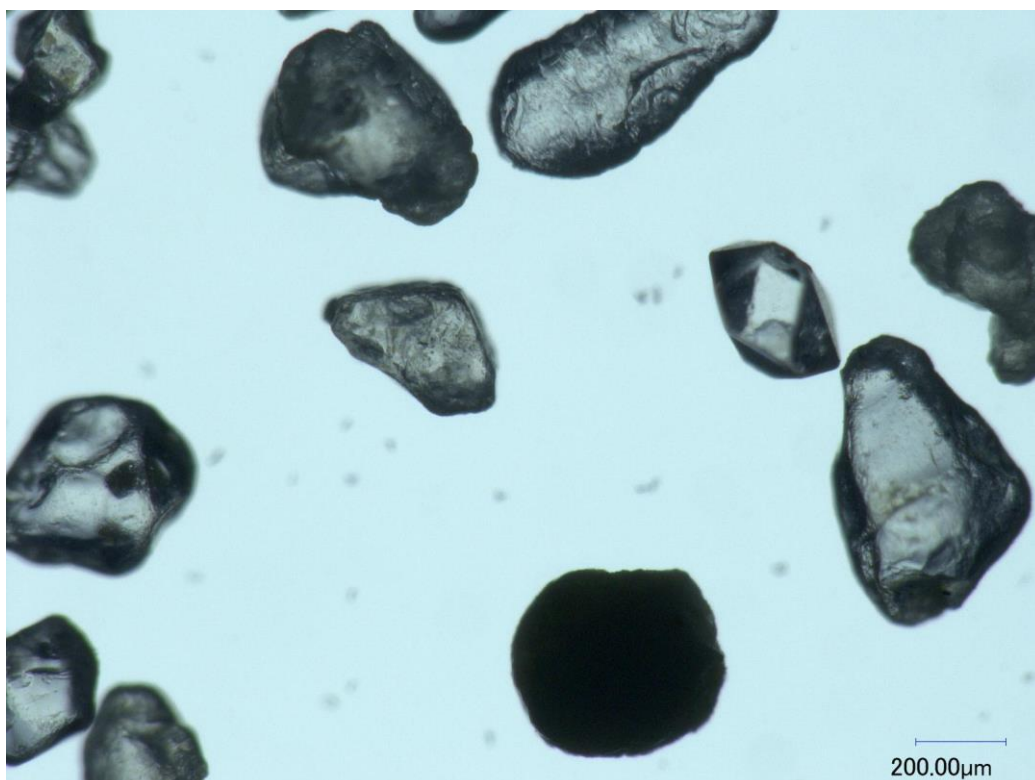


写真 2.2.2 飯豊砂 6 号

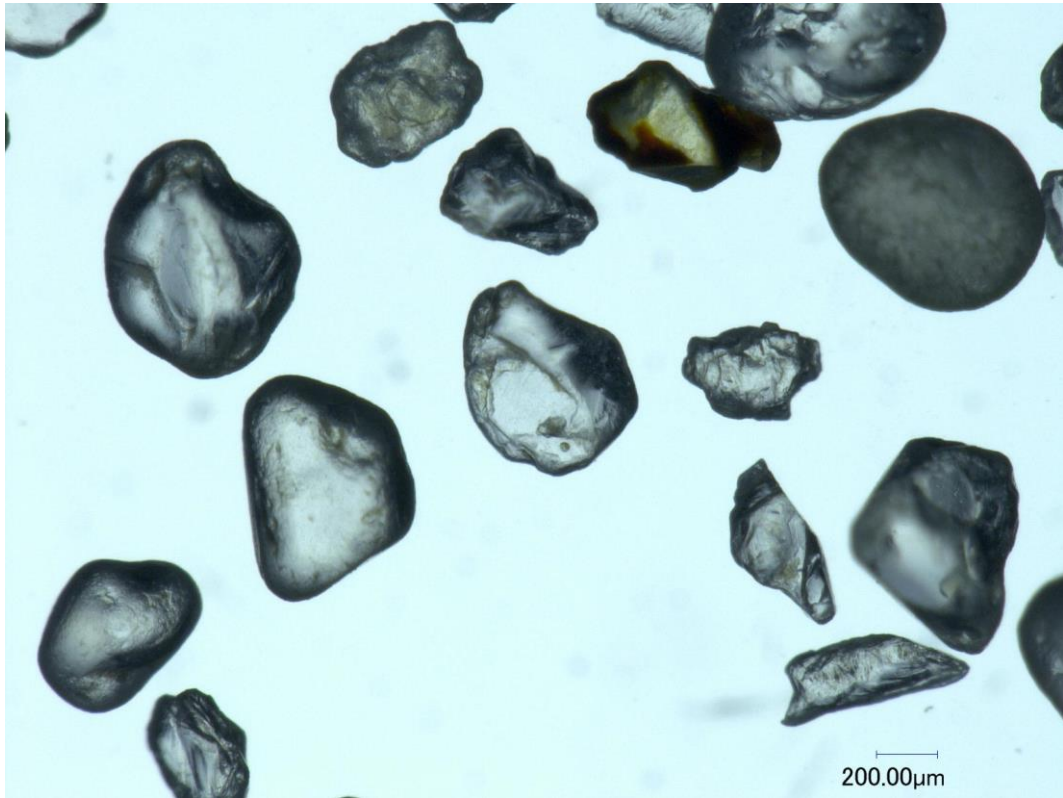


写真 2. 2. 3 飯豊砂 5 号

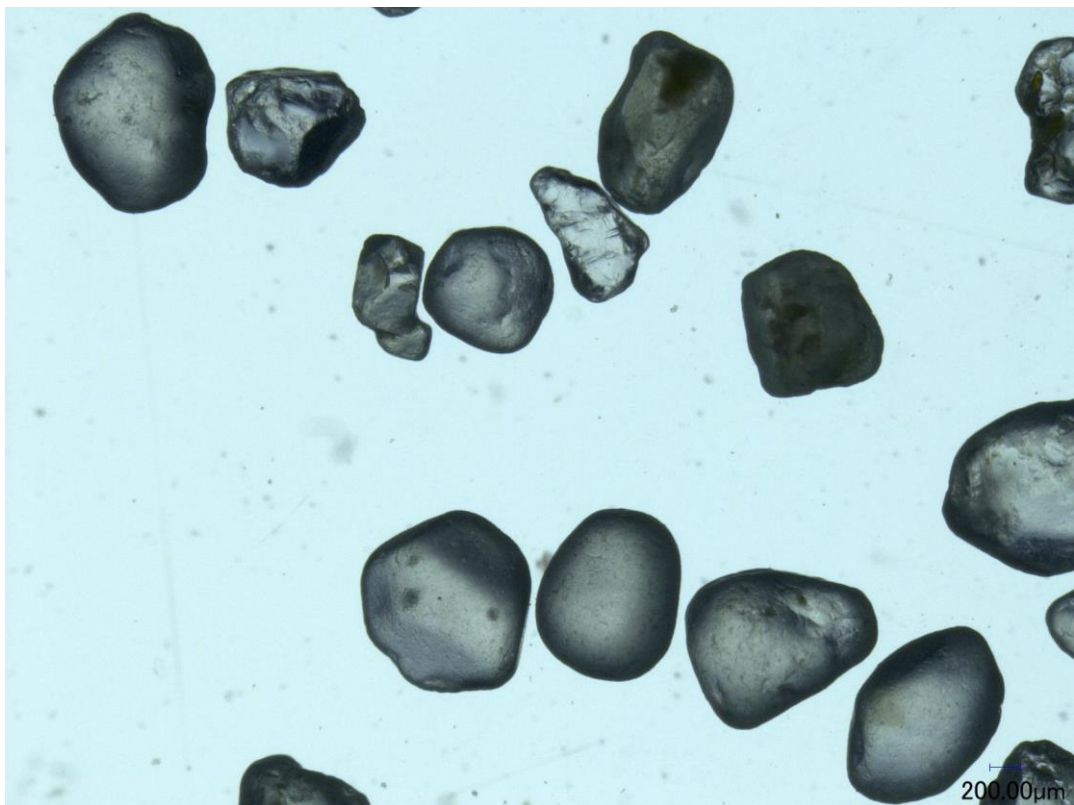


写真 2. 2. 4 飯豊砂 4 号

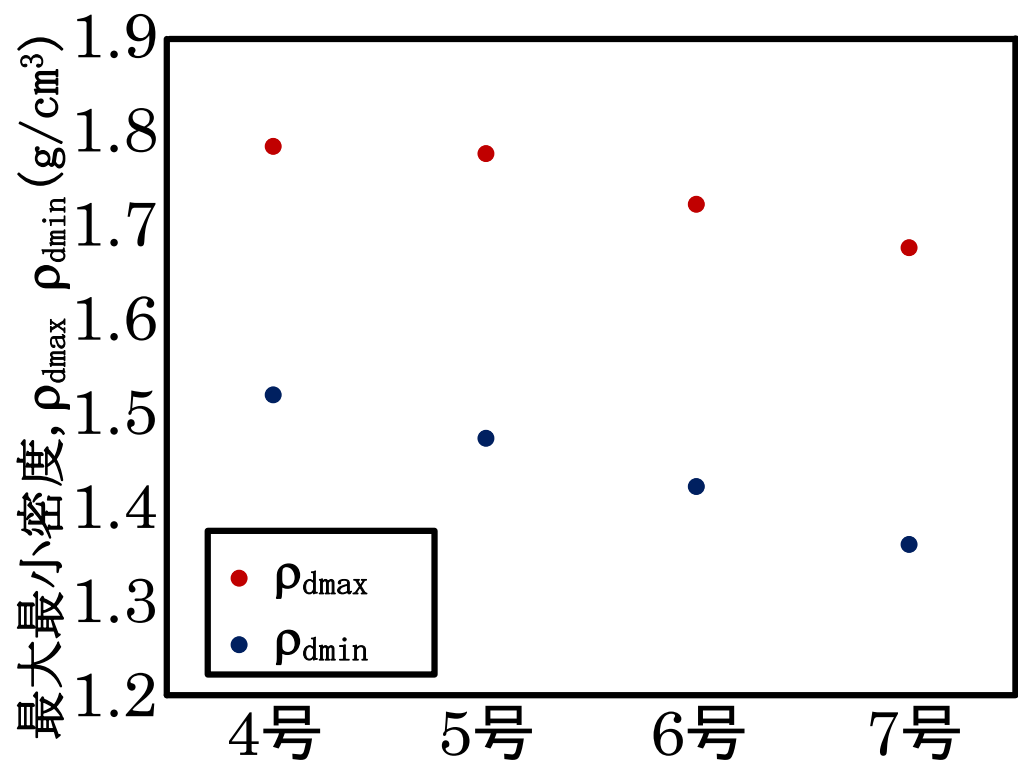


図 2. 2. 1 4～7 号飯豊砂の最大最小密度

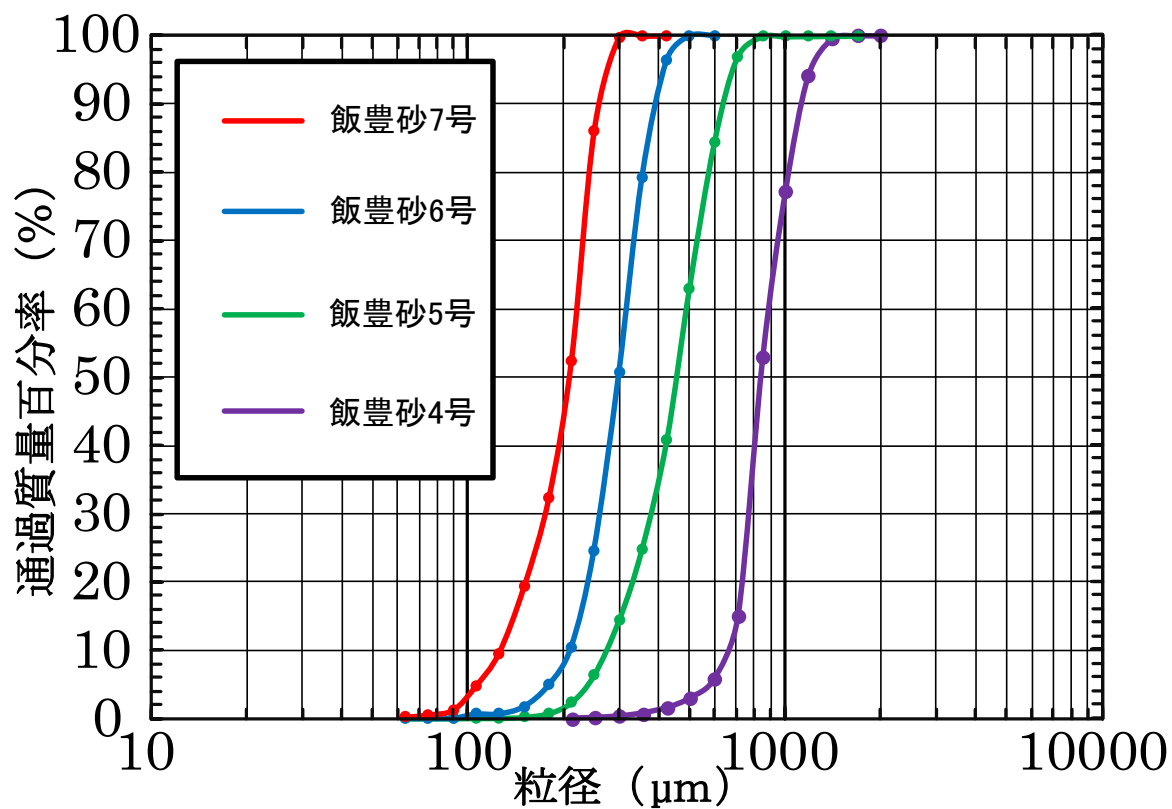


図 2. 2. 2 4～7 号の飯豊砂の粒径加積曲線

2.3 岐阜砂

本研究に使用した岐阜砂の特徴を以下に示す。

購入経路に関して、正確な採掘地はわからないが(株)小高銀砂工場から購入し、(有)竹折砥業所を経由して、瑞浪シリカ協業組合（岐阜県瑞浪市稲津町小里）から出荷されたものを使用した。

今回使用した岐阜砂は7号（写真 2.3.1）、6号（写真 2.3.2）の2種であり、6、7号砂ともに豊浦砂と粒径が近く、粒子の形状は豊浦砂と比べて角張った形をしている。

表 2.3.1 および図 2.3.1 は各号数の岐阜砂の最大最小密度、図 2.3.2 は粒形加積曲線である。

表 2.3.1 6, 7 号岐阜砂の最大最小密度

	6号	7号
$\rho_{\text{dmin}}(\text{g/cm}^3)$	1.208	1.171
$\rho_{\text{dmax}}(\text{g/cm}^3)$	1.484	1.477

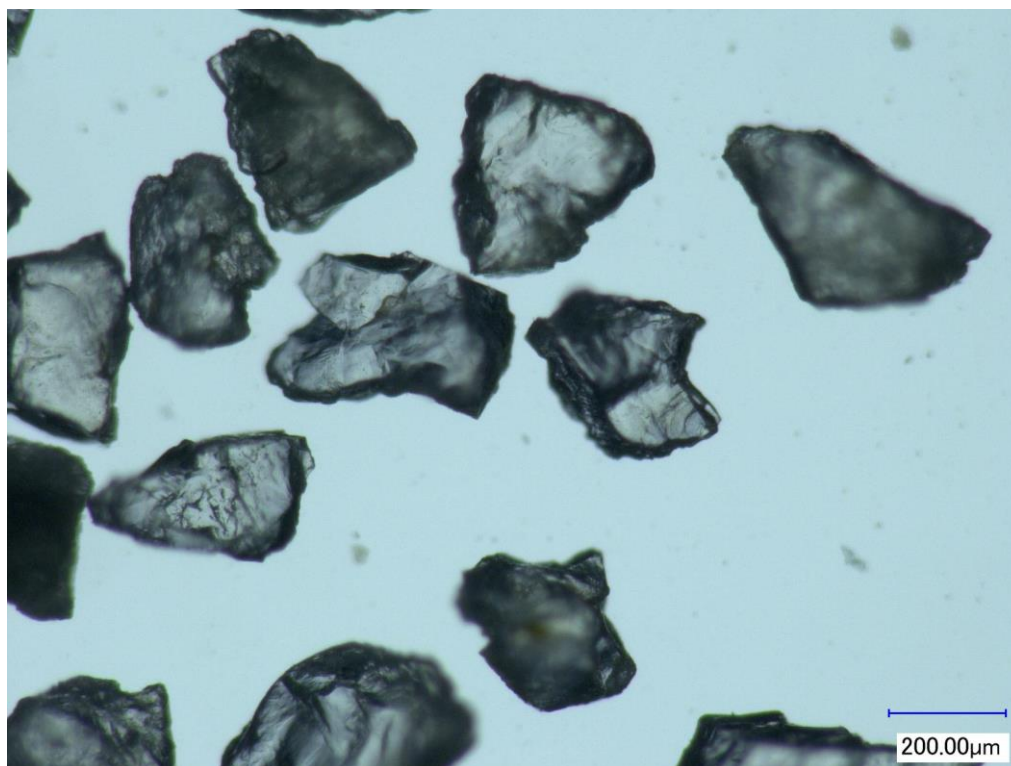


写真 2.3.1 岐阜砂 7 号

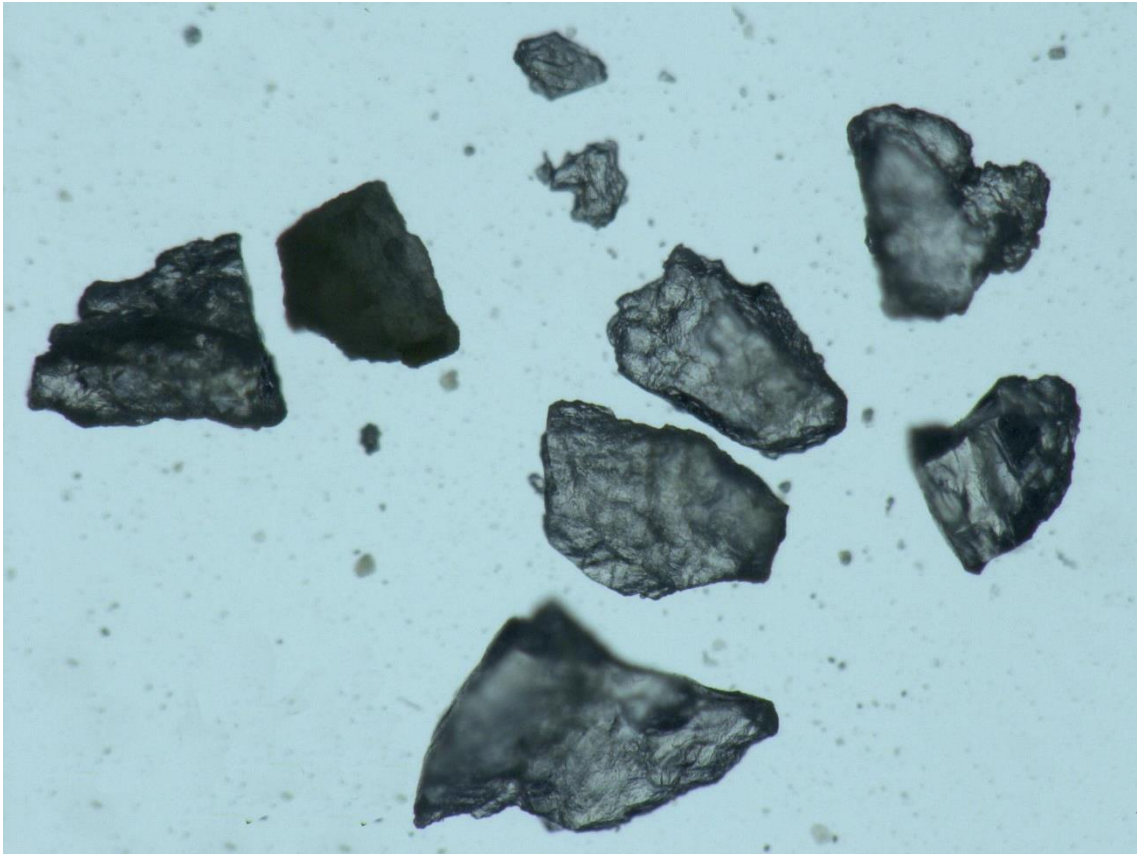


写真 2. 3. 2 岐阜砂 6 号

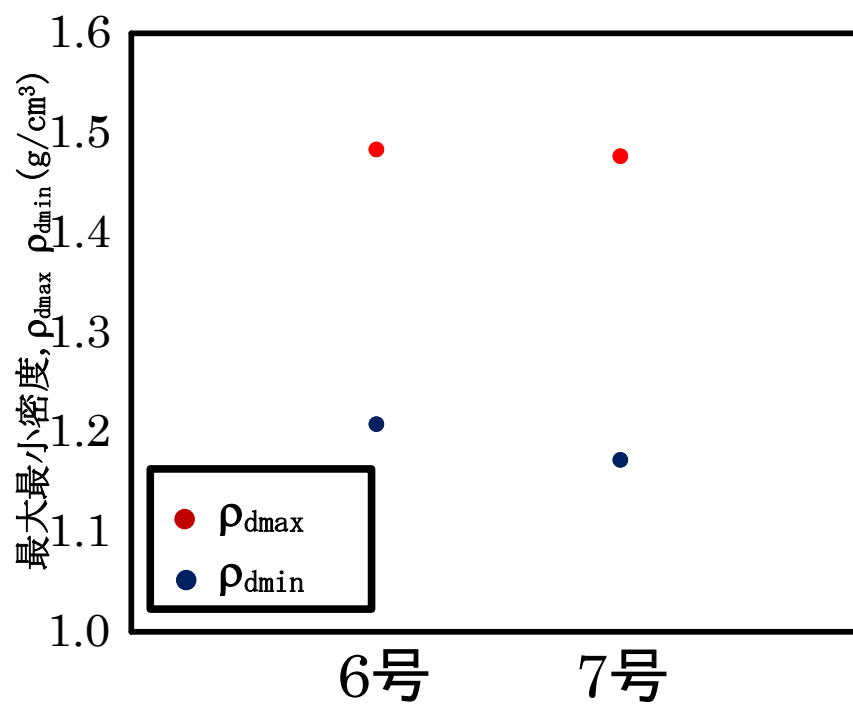


図 2. 3. 1 6, 7 号岐阜砂の最大最小密度

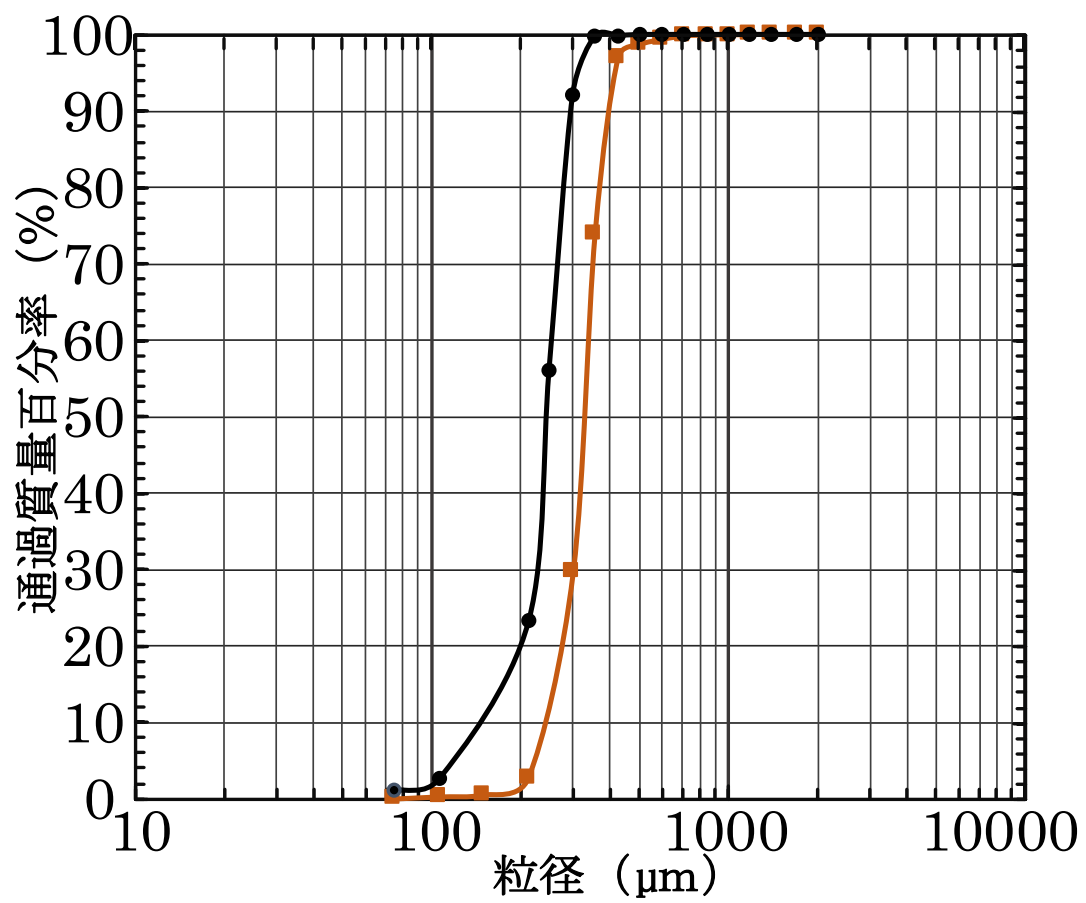


図 2. 3. 2 6, 7 号岐阜砂の粒径加積曲線

第 3 章

三軸せん断試験

3.1 高圧三軸せん断試験

3.1.1 高圧三軸試験装置

本研究では、1000kPa 以上の高圧帯の方が低圧部に比べて粒子破碎の影響が顕著であることから試験装置として高圧試験装置を用いた。今回使用した高圧三軸試験装置は高さ 10cm、直径 5cm の供試体に対して鉛直方向からモーターによって自動制御で鉛直力を加え、供試体側面にはセル室を満たした水を介して水圧によって拘束圧を加え制御しする。なお今回使用した装置は通常の三軸装置にはない増圧装置を介することによって 1000kPa 以上の高圧を発生させることが可能である。試験装置の詳細は誠研舎の水・空気パネル型 DTC-523-3 で、軸力検出容量は 50kN、側圧および間隙水圧検出容量は 5MPa である。実験装置の圧力配管図を図 3.1.1.1 に示した。写真 3.1.1.1 は高圧三軸試験機の全体図、写真 3.1.1.2 は増圧装置の拡大図である。また写真 3.1.1.3～3.1.1.14 には、実際の装置の全体を載せた。

供試体の拘束圧力は最大 10MPa、軸圧縮力は最大 50t にも達するので、特に安全には細心の注意を払って実験を進めている。

載荷装置用コントローラー

鉛直方向載荷に関しては自動制御と手動制御が可能であり、手動制御に関しては装置右方に位置するハンドルを回すことで鉛直方向の載荷・除荷を行う。自動制御に関しては一定速度モードと外部制御モードの二つのモードを持つ。一定速度モードは速度を設定して一定の速度で載荷する通常の運転モードであり、外部制御モードは外部から指令電圧（-5V～5V）を入力することにより電圧に比例する速度で運転するモードである。本三軸試験では、せん断した際に一定な載荷速度(1mm/min)モードで実施した。

ベローフラム式増圧器

通常の三軸試験機に比べ高い圧力が得られるため、ベローフラム式増圧器が付けられた。(写真 2.5) 輸出圧力は加えった圧力の 8 倍に拡大され、5MPa までセル圧を載荷することが可能である。

セル室

図 2.3 の右部に示す金属製セルの重量は 100 kg にも達するものであり、装置左方に位置するハンドルを回す操作により上下に移動する。高圧に耐えるためにアクリル製ではなく金属で作られているこのため実験中供試体の観察が不可能である。



写真 3. 1. 1. 1 試験装置全体



写真 3. 1. 1. 2 増圧装置

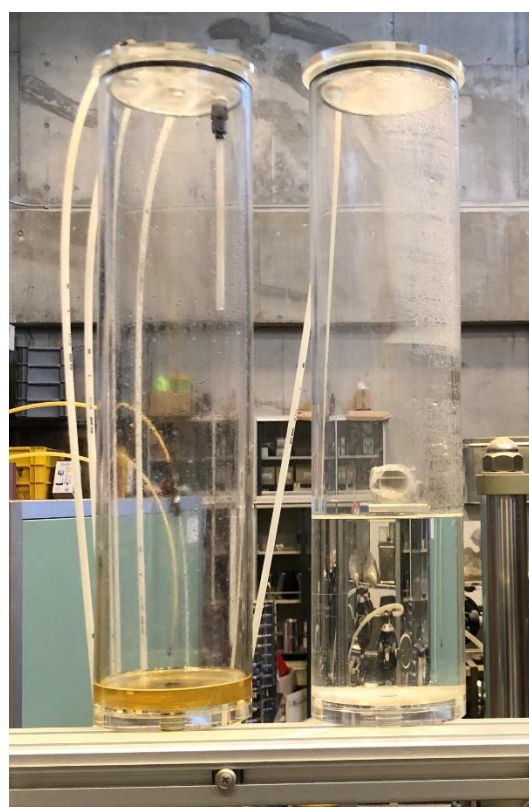


写真 3. 1. 1. 3 真空タンク・脱気水タンク

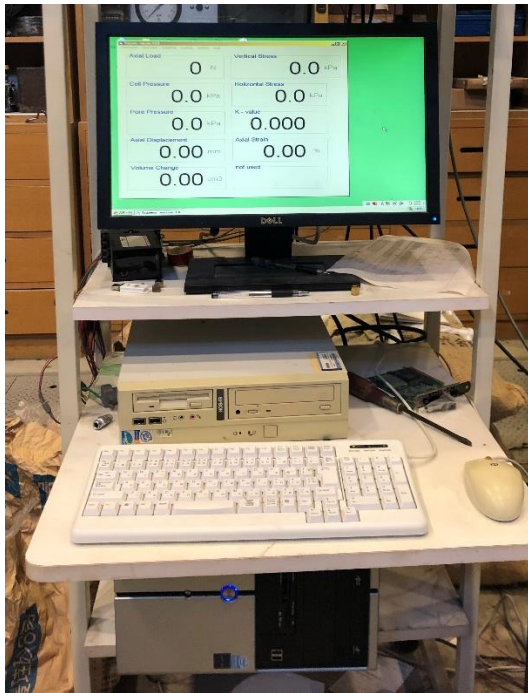


写真 3.1.1.4 パーソナルコンピュータ



写真 3.1.1.5 油圧式真空装置



写真 3.1.1.6 制御パネル

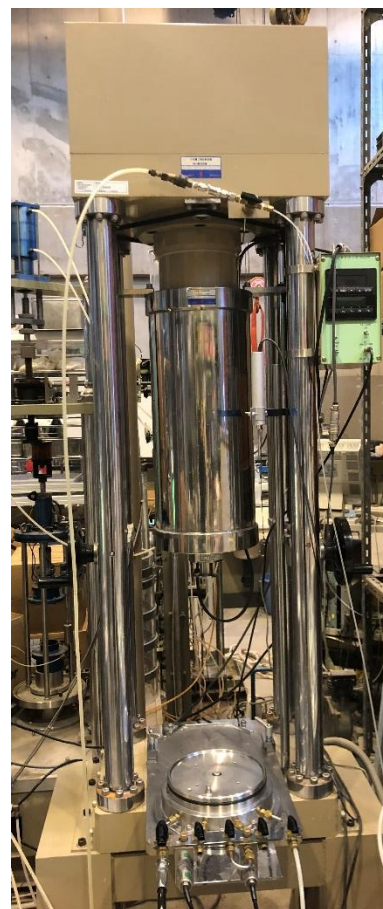


写真 3.1.1.7 载荷装置全体



写真 3.1.1.8 金属セル

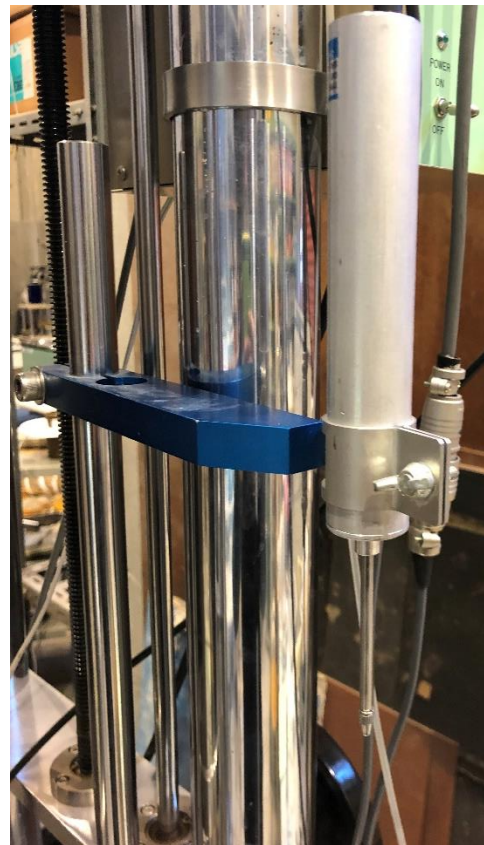


写真 3.1.1.9 鉛直変位計

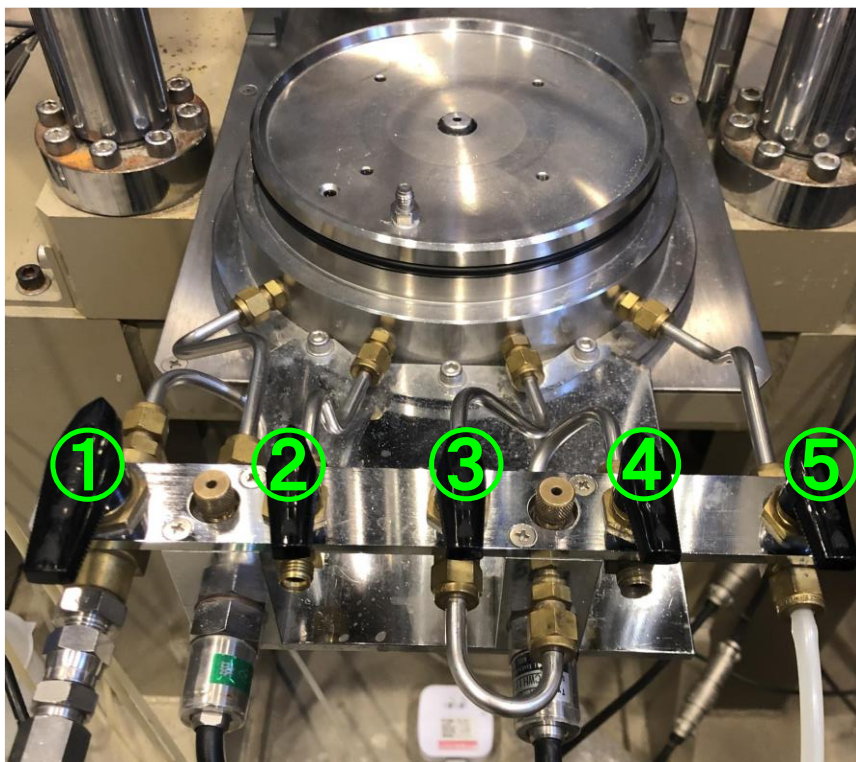


写真 3.1.1.10 供試体台座



写真 3.1.1.11 载荷装置用コントローラー



写真 3.1.1.12 セン断中の様子

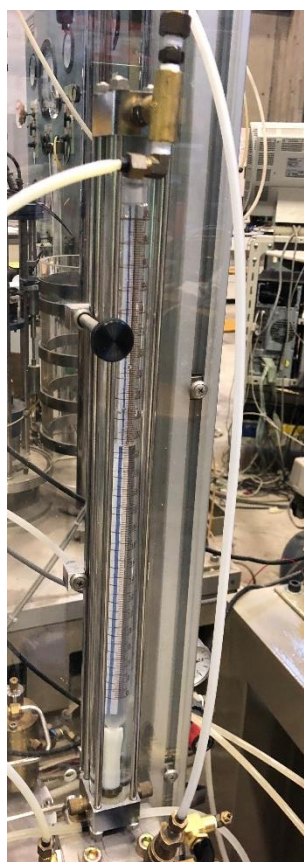


写真 3.1.1.13 ビュレット



写真 3.1.1.14 セル水タンク

3.1.2 使用した用具

以下に今回の実験の際に使用した用具の写真を載せる。

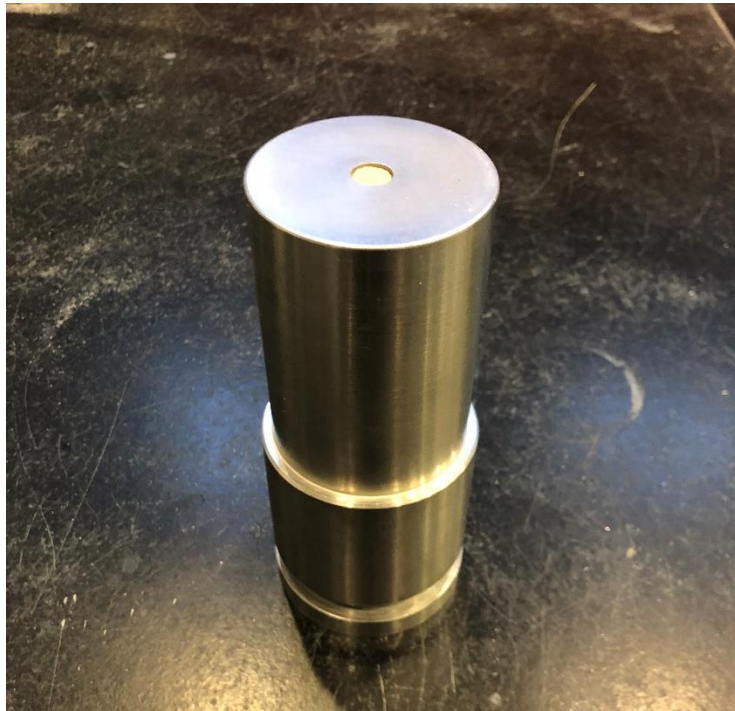


写真 3.1.2.1 供試体土台

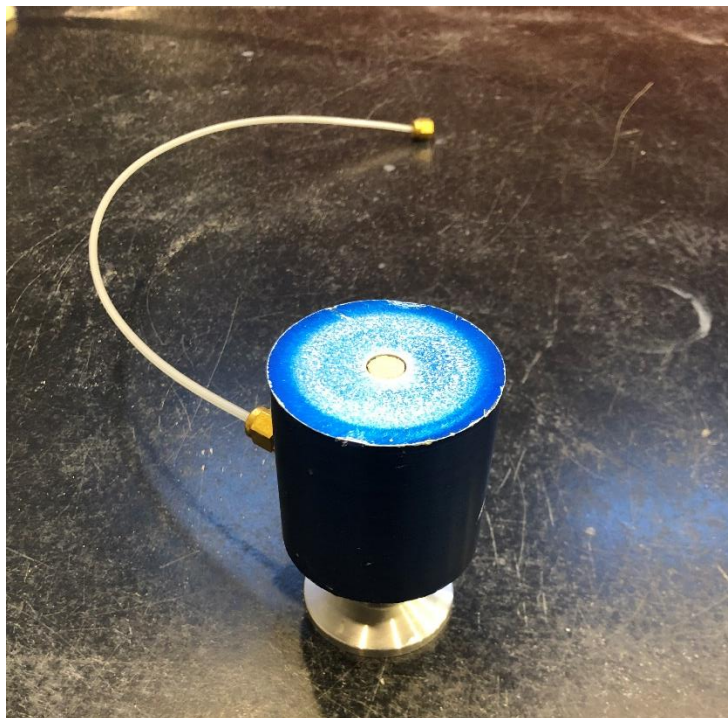


写真 3.1.2.2 キャップ



写真 3.1.2.3 ポーラストーン



写真 3.1.2.4 モールド



写真 3.1.2.5 モールド留め具



写真 3.1.2.6 キャップと鉛直载荷軸の留め具



写真 3.1.2.7 ノギス

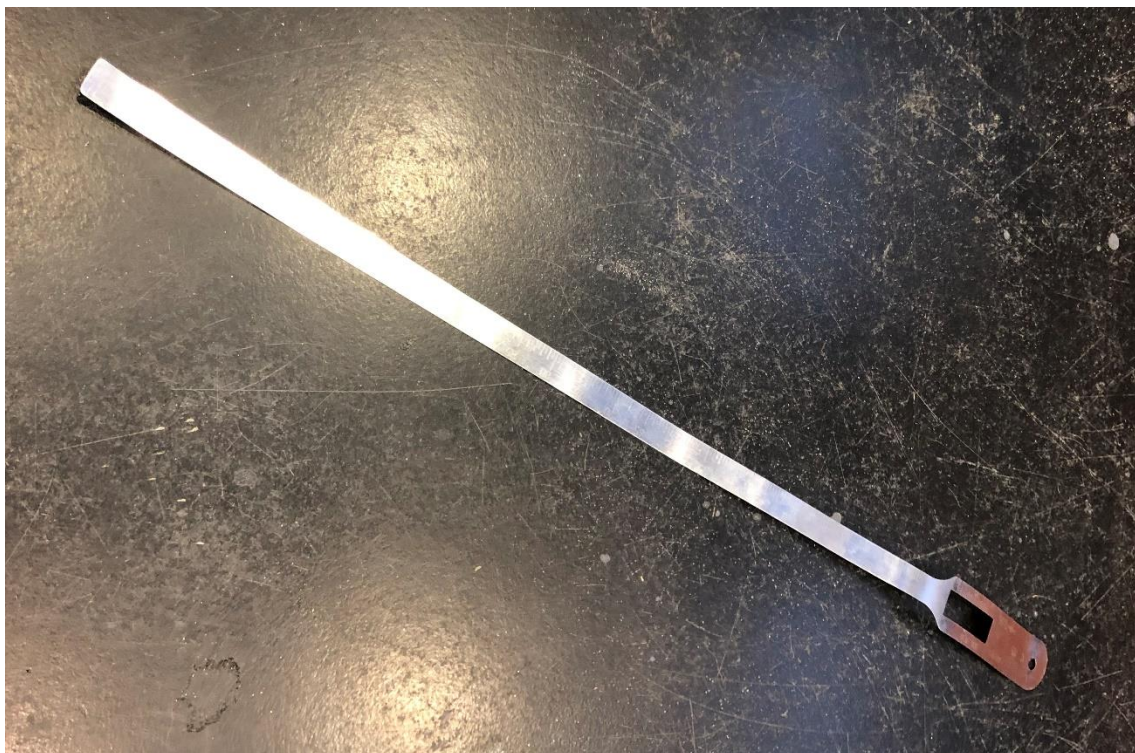


写真 3.1.2.8 π テープ

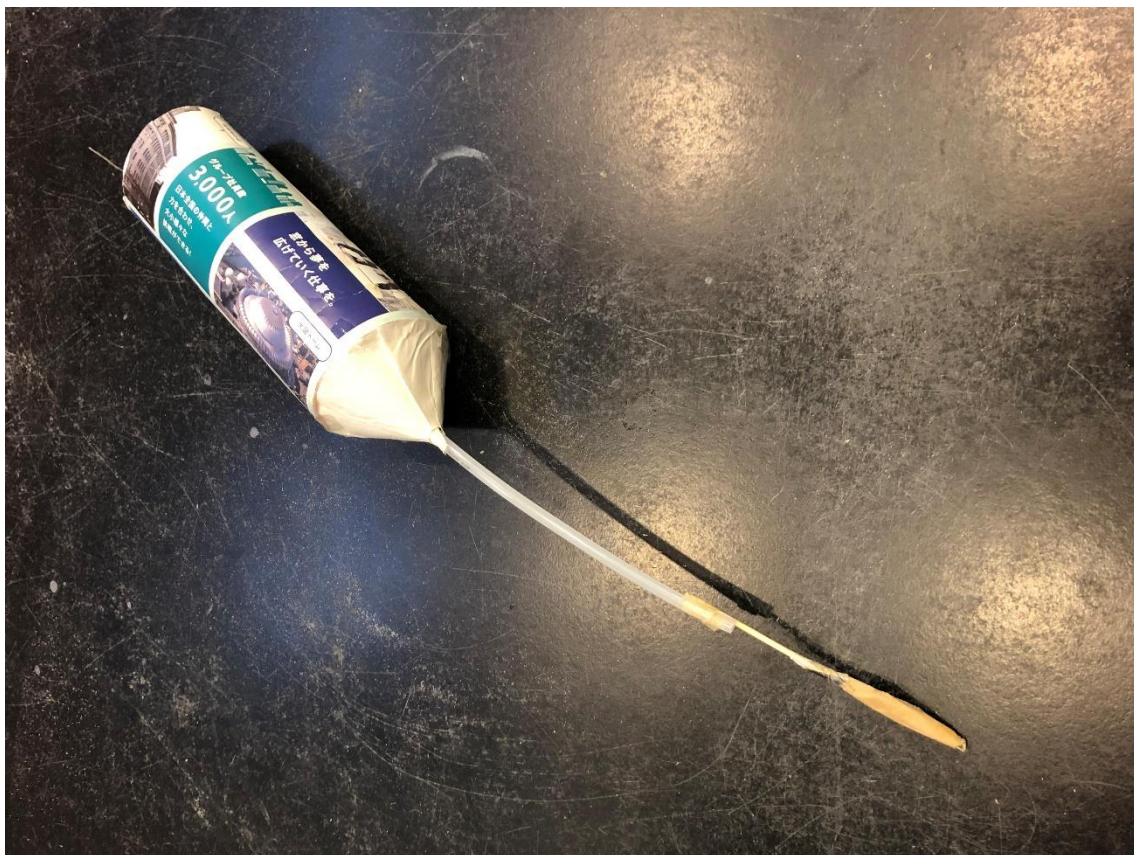


写真 3.1.2.9 紙ロート

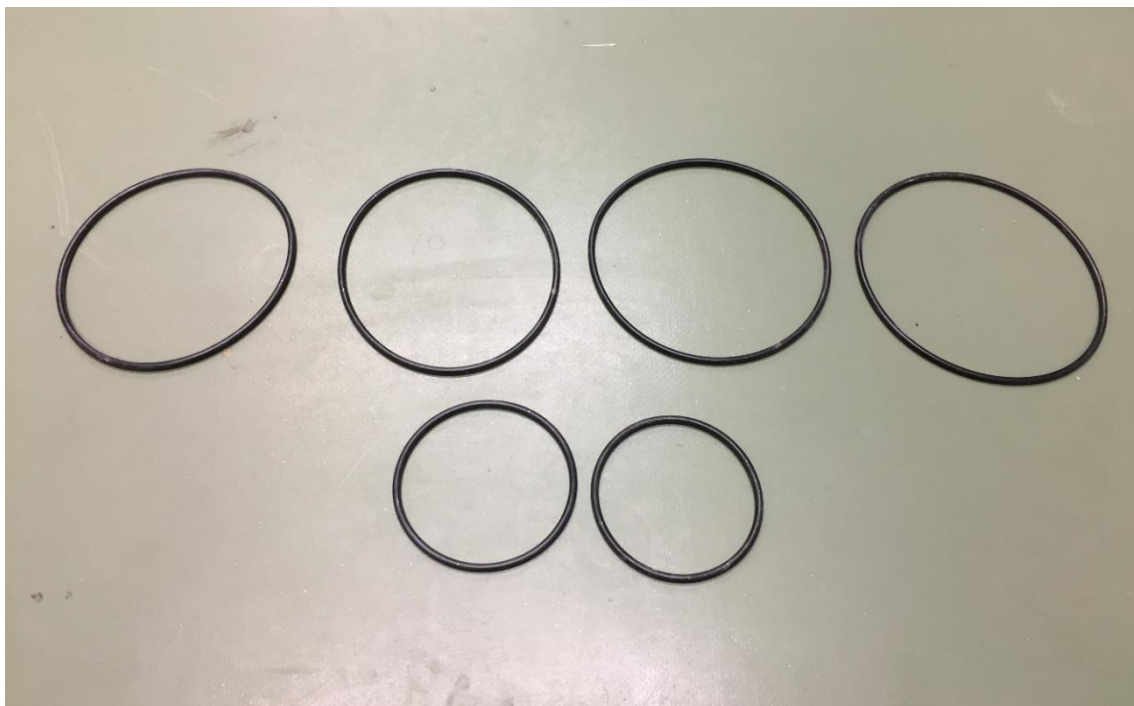


写真 3.1.2.10 O-リング



写真 3.1.2.11 二酸化炭素ボンベ



写真 3.1.2.12 メンブレン



写真 3.1.2.13 筆



写真 3. 1. 2. 14 250 μ m ふるい



写真 3. 1. 2. 15 106 μ m ふるい

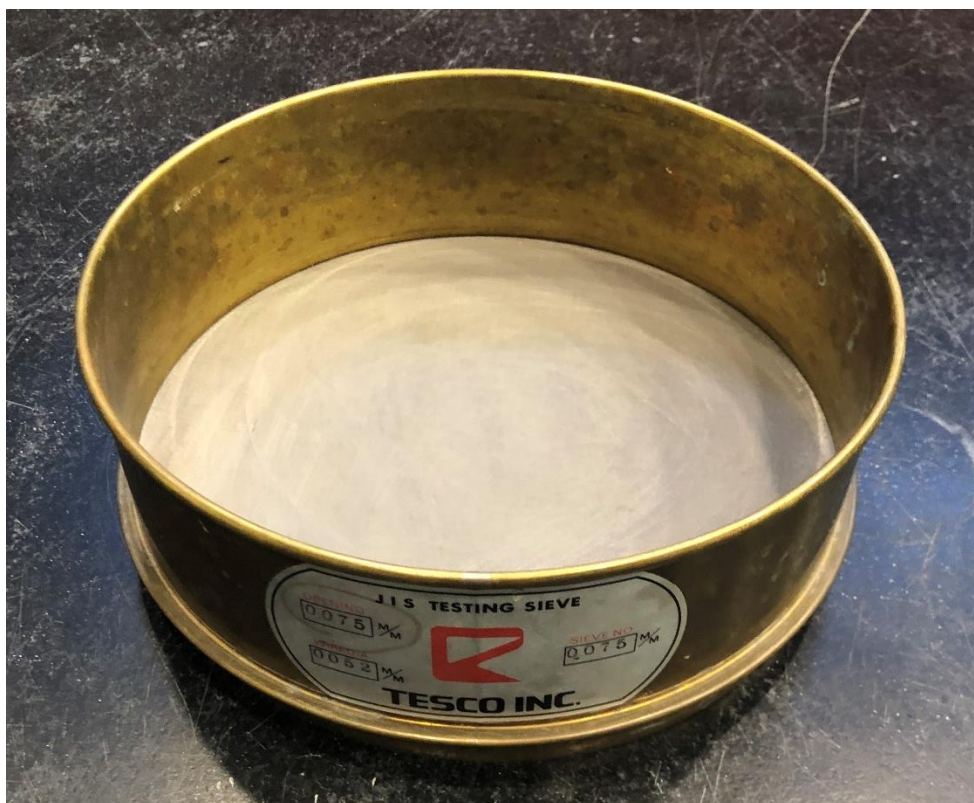


写真 3.1.2.16 75 μ m ふるい



写真 3.1.2.17 ふるい受け皿



写真 3.1.2.18 ふるい装置



写真 3.1.2.19 乾燥炉

3.1.3 試験方法

供試体作成

1

φ50×L180×T0.5mm のメンブレンに、中央付近の両面に縦 100mm の線とその両端に線を引く。

2

供試体の土台に O リングを取り付ける。この時、中央にポーラストーンがはまっていることに注意する。

3

土台にメンブレンをセットする。この時、最初にした横線が土台の約 5mm 内側に円が崩れないようにし、縦に 100mm 引いた線が垂直になるようにセットする。

4

モールドを土台にセットし、メンブレンとモールドの間を-10kPa 程度で引き密着させる。

5

落下高さ 10 cm の空中落下法で砂を堆積させる。ここで使う試料は 106μm の目のふるいを用いてあらかじめ細粒分を取り除いたものを使用する。堆積が終わったら表面をすり切り、筆などを使って周りの砂を払い、キャップ（図-2）を載せる。

6

キャップをしっかりと抑えたままメンブレンをキャップにかぶせ、あらかじめキャップに取り付けておいた O リングを下ろしはめる。その後メンブレンを引いていた負圧を 0 kPa にし、供試体の上部に通じるバルブを閉じ、供試体の下側から拘束圧-20kPa の負圧をかける。

7

モールドを外し、拘束圧-30 kPa で供試体を自立させ、供試体寸法を測る。供試体寸法の測定では、πテープを用いて円周を、ノギスを用いて高さを測定する。

上記の操作を行う際は供試体にできるだけ振動を与えないように注意する。振動を与えてしまうと砂の密度が変わってしまうので、配管やモールドを外すときには特に気を付ける。

排水試験過程

1

キャップ上部を載荷装置と接続したのち、装置左方のハンドルを回しセルを下ろす。

2

セルに水を入れ、カバーと供試体の間を水で満たす。

3

セル内が水で満たされたら増圧装置をセル圧と接続し、セル圧を 50 kPa にするとともにそれまで作用していた負圧-30 kPa を 0 kPa に戻す。この時セル圧と負圧の和が 0 kPa となるようにできるだけ注意する。

4

供試体の上下につながるバルブが解放されていることを確認したのちにセル圧を目的の拘束圧に合わせ、20～30 分程圧密を行う。この間セル圧は徐々に変化し、軸方向ひずみが徐々に低下するため、軸方向載荷を調節し不要な力が供試体にはたらかないように注意する。

5

圧密後の変化を記録した後に、せん断を開始する。一定載荷モードと外部制御モードの選択は試験方法によって切り替える。

6

せん断が終了したらセル水を抜き、供試体を取り出し、バットに移す。メンブレンの内側についた破碎した砂も水で流しとり、バットに取る。この時、乾燥砂のまま試験を行うことから、空気が乾燥している場合は静電気により細粒分がメンブレンに付きやすくなるためよく水で流しとり、砂の流失には十分注意する。

7

試料を乾燥炉に約 24 時間程度放置して炉乾燥させる。

8

炉乾燥終了後、250 μ m、106 μ m、75 μ m の目のふるいを用いてふるい分けを行い、通過質量率を計測する。ふるい分けは自動ふるい機を用いて 30 分間ふるう。

非排水試験過程

今回の試験では一部非排水試験を行った、以下にその過程を記す。なお供試体作成及び排水試験過程 1～3 までは同一の工程を行う。

1

供試体が水で満たされ、拘束圧 50kPa とした後に、供試体の下側に通じるバルブから二酸化炭素を注入し、供試体上部から排出する。この作業は、供試体の飽和度を高めるために行うものであり、30 分間行う。この間に、真空ポンプを用いて、制御盤上部のタンクの水を-100 kPa の真空で引き脱気水を作成しておく。

2

二酸化炭素の注入が終了した後、供試体の下部ラインを制御盤上部の脱気水タンクと接続し、供試体に脱気水を注入・飽和させる。この時、初期段階では、上部からは供試体内の空気が気泡として出ている段階ではバルブは半開とし、急激な脱気水の注入による不飽和を防ぐ。供試体内の空気がすべて排出され注入している脱気水が排出されたらバルブを全開にして飽和させる。この工程は 30 分ほど行う。

3

供試体の飽和が終了した後、脱気水タンクとの接続を切り、ビュレットと供試体上下を接続する。なお、ビュレットの目盛りは後の操作で上下するため、20mm ほどにあらかじめ調整してあることが望ましい。

4

供試体の飽和度を確かめるために、B 値（飽和度）チェックを行う。まず、ビュレット上部を圧力装置とつなぎ、間隙圧を加えることが出来るようにする。その後、供試体上部と供試体下部につながるバルブ②と③を閉め拘束圧を 50 kPa から 150 kPa までゆっくりと上昇させる。この時の間隙圧の変化を拘束圧の変化量で除したものを B 値（飽和度）として確認する。その後、ビュレットを 100 kPa にしてからバルブ③を開ける。再びバルブ③を閉じ同様の過程で拘束圧 250 kPa 間隙圧 200kPa まで変化させる。その段階で飽和度が 96%以上であれば終了し、そうでなければ再びバルブ③を閉じ同様の過程で飽和度を高める。

なお、上記 1～4 の工程を排水試験過程 3 と 4 の間におこなうことで、飽和砂の排水試験を行うことが可能である。

4

ビュレットの読みを記録した後、バルブはすべて解放した状態で拘束圧を（所定の値＋間隙圧の値）まで上昇させ圧密を 30 分間行う。

5

圧密終了後、ビュレットの変化と鉛直方向変位を記録し、供試体上下のバルブ②④を閉じてせん断を行う。

6

せん断終了後、ビュレットを真空で引き-20 kPa とする。セル圧を減少させセル水を排出してからセルを上るその後、鉛直軸とキャップの接続を解き、供試体表面を手で

叩く、あるいは揉んで供試体内の間隙水の絞り出しを行う。十分に間隙水が絞り出されたら間隙圧を-30kPa まで上げ、供試体上下バルブ②④を閉じる。

7

メンブレンの取り外しは供試体上部からおこなう。これは内部に負圧がはたらいっている状態で径の細い配管から取り外すと内部に残留している水分が供試体内に引き込まれてしまうことを防ぐためである。

8

取り出した供試体は含水比を測定するために2分割してバットへ移す。分け方は供試体の上下と中央部の2カ所である。せん断により供試体は端面拘束の影響から上下と中央部で状況が異なっていると考えられるためである。

9

試料を乾燥炉に約24時間程度放置して炉乾燥させる。

10

炉乾燥終了後含水比を測定した後、250 μm 、106 μm 、75 μm の目のふるいを用いてふるい分けを行い、通過質量率を計測する。ふるい分けは自動ふるい機を用いて30分間ふるう。

単調載荷試験と繰り返し載荷試験

本研究では単調載荷試験のほかに繰り返し載荷試験も行った。単調載荷試験については一定制御モードを使用して行った。一方繰り返し載荷試験については電圧による自動制御を用いて一定のひずみ振幅のもと載荷・除荷を繰り返し行うことができるようプログラムを改良して試験を行った。

写真3.1.3.1は試験終了後、メンブレンの中から試料を取り出した時の写真であり、写真3.1.3.2～3.1.3.5は順に250 μm 、106 μm 、75 μm 、75 μm 未満のふるい分け後の試料の写真である。



写真 3. 1. 3. 1 試験終了後取り出した砂の様子



写真 3. 1. 3. 2 試験後 250 μ m ふるい残留試料の様子



写真 3. 1. 3. 3 試験後 106 μ m ふるい 残留試料の様子



写真 3. 1. 3. 4 試験後 75 μ m ふるい 残留試料の様子



写真 3.1.3.5 試験後 75 μ m ふり通過試料の様子

3.2 三軸せん断試験

3.2.1 三軸試験装置

低圧部での粒子破碎による細粒分の増加は小さいことが知られているが、低圧部から高圧部へ移るにつれどのような変化をしているのかを調べるために低圧での試験も行った。今回使用した三軸試験装置は高さ 10cm、直径 5cm の供試体に対して鉛直方向からモーターによって自動制御で鉛直力を加え、供試体側面にはセル室を満たした水を介して水圧によって拘束圧を加えることにより制御する。装置スペックは軸力検出容量 2kN、側圧および間隙水圧検出容量は 2000kPa である。写真 3.2.1.1 はせん断前の供試体の様子である。また、写真 3.2.1.2～3.2.1.10 は三軸試験装置の概要を載せた。



写真 3.2.1.1 せん断前の供試体の様子



写真 3. 2. 1. 2 試験装置全体



写真 3.2.1.3 セル水タンク



写真 3.2.1.4 ビュレット

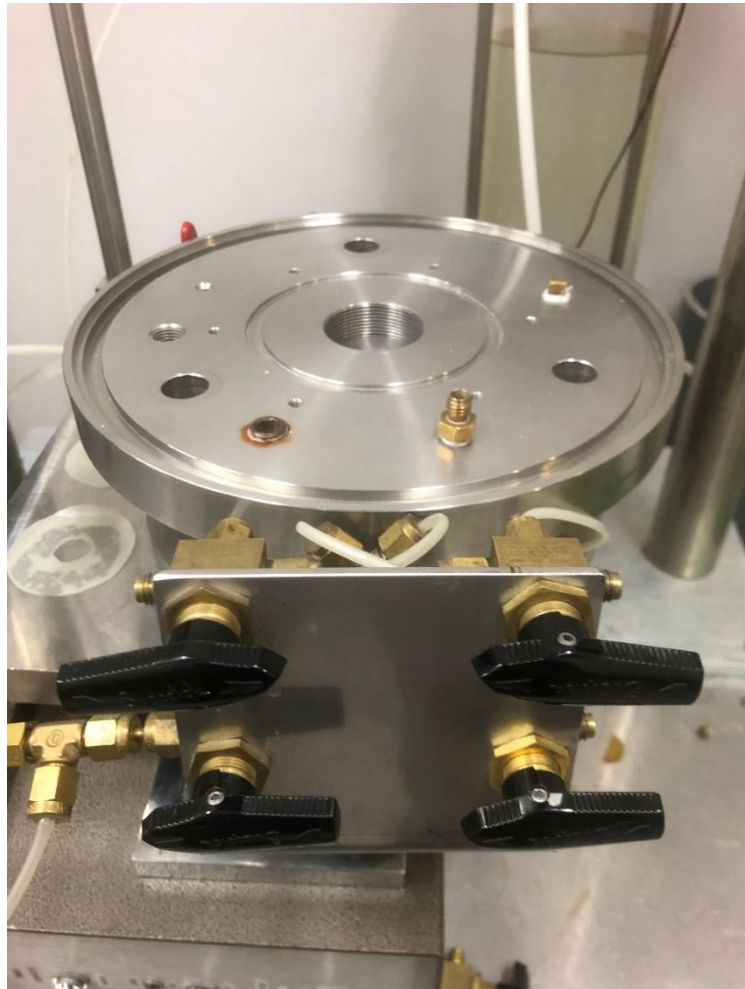


写真 3. 2. 1. 5 供試体台座



写真 3. 2. 1. 6 載荷装置



写真 3. 2. 1. 7 鉛直変位計

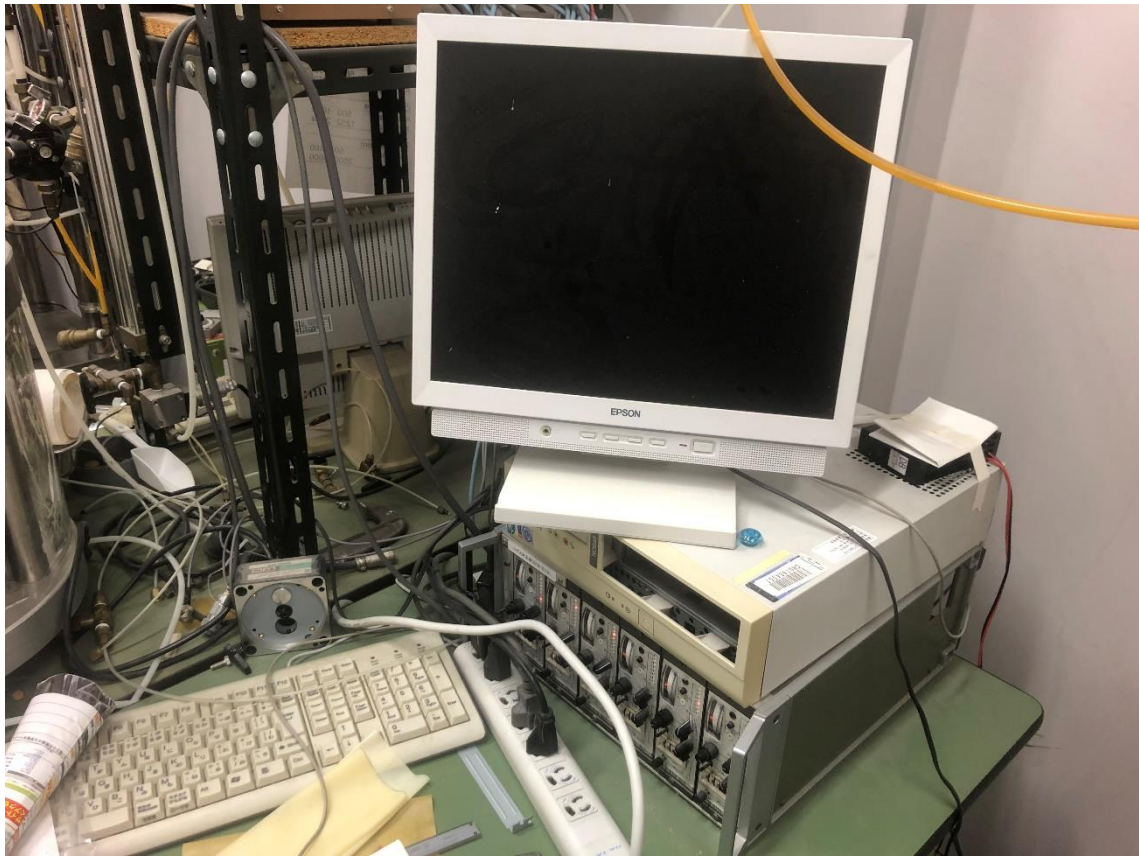


写真 3. 2. 1. 8 パーソナルコンピュータ



写真 3. 2. 1. 9 封印環



写真 3.2.1.10 アクリルセル

3.2.2 使用した用具

本試験で使用した用具については高圧試験と同様のものがある。(写真 3.1.2.7～3.1.2.13 を参照)

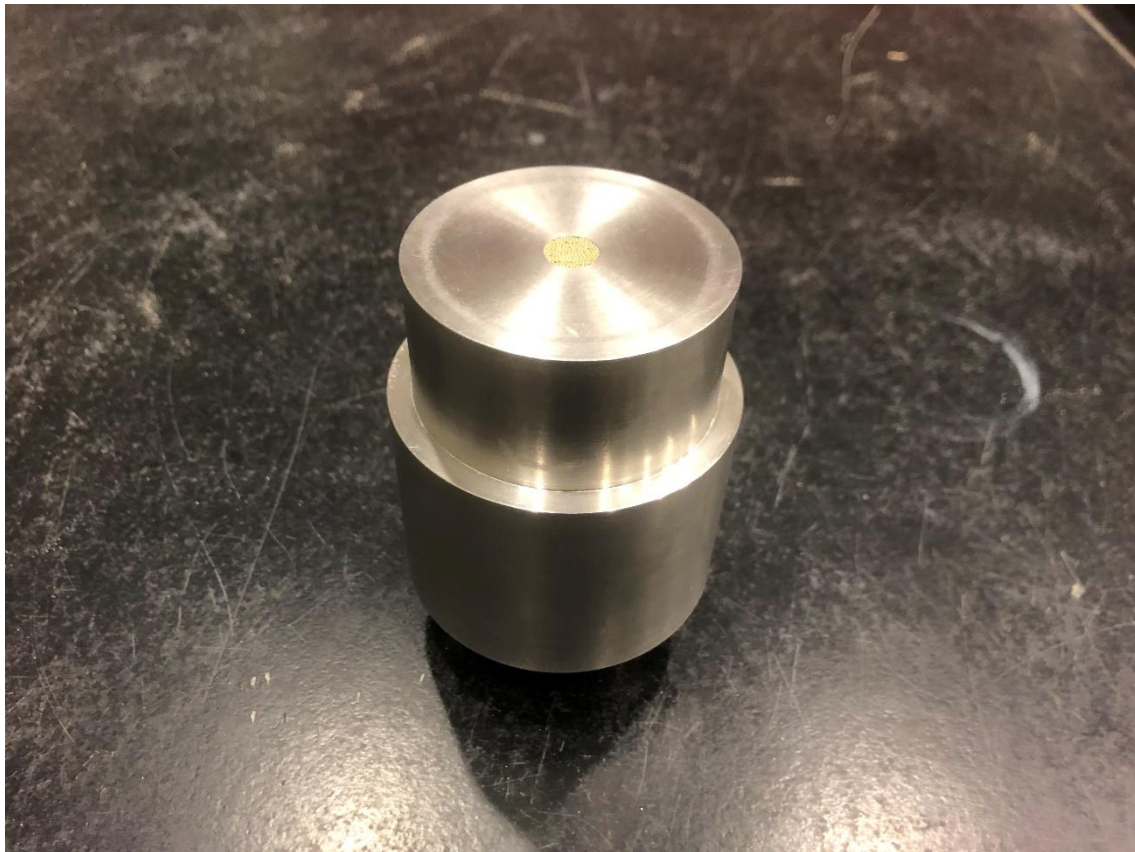


写真 3.2.2.1 供試体土台

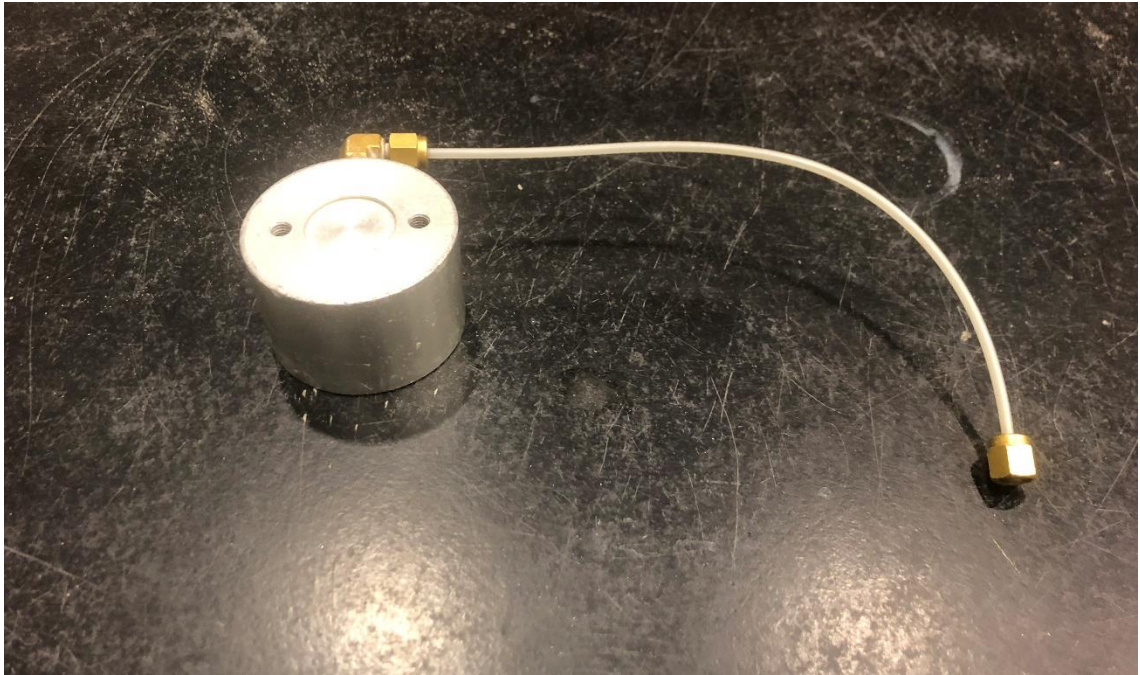


写真 3. 2. 2. 2 キャップ



写真 3. 2. 2. 3 モールド



写真 3.2.2.4 モールド留め具

3.2.3 試験方法

供試体作成

- 1
φ 50×L180×T0.5mm のメンブレンに、中央付近の両面に縦 100mm の線とその両端に線を引く。
- 2
供試体の土台に O リングを取り付ける。
- 3
土台にメンブレンをセットする。この時、最初にした横線が土台の約 5mm 内側に円が崩れないようにし、縦に 100mm 引いた線が垂直になるようにセットする。
- 4
モールドを土台にセットし、メンブレンとモールドの間を-10kPa 程度で引き密着させる。

5

落下高さ 10 cmの空中落下法で砂を堆積させる。ここで使う試料は 106 μm の目のふるいを用いてあらかじめ細粒分を取り除いたものを使用する。堆積が終わったら表面をすり切り、筆などを使って周りの砂を払い、キャップを載せる。

6

キャップをしっかりと抑えたままメンブレンをキャップにかぶせ、あらかじめキャップに取り付けておいた O リングを下ろしはめる。その後メンブレンを引いていた負圧を 0 kPa にし、供試体の上部に通じるバルブを閉じ、供試体の下側から拘束圧-10kPa の負圧をかける。

7

モールドを外し、拘束圧-20 kPa で供試体を自立させ、供試体寸法を測る。供試体寸法の測定では、 π テープを用いて円周を、ノギスを用いて高さを測定する。

上記の操作を行う際は供試体にできるだけ振動を与えないように注意する。振動を与えてしまうと砂の密度が変わってしまうので、配管やモールドを外すときには特に気を付ける。

排水試験過程

1

キャップ上部を載荷装置と接続したのち、アクリルセルをかぶせ封印環で密閉する。

2

セルに水を入れ、カバーと供試体の間を水で満たす。

3

セル内が水で満たされたら増圧装置をセル圧と接続し、セル圧を 20 kPa にするとともにそれまで作用していた負圧-20 kPa を 0 kPa に戻す。この時セル圧と負圧の和が 0 kPa となるようにできるだけ注意する。

4

供試体の上下につながるバルブが解放されていることを確認したのちにセル圧を目的の拘束圧に合わせ、20～30 分程圧密を行う。この間セル圧は徐々に変化し、軸方向ひずみが徐々に低下するため、軸方向載荷を調節し不要な力が供試体にはたらかないように注意する。

5

圧密後の変化を記録した後に、一定速度でせん断を開始する。

6

せん断が終了したらセル水を抜き、供試体を取り出し、バットに移す。メンブレンの内側についた破碎した砂も水で流しとり、バットに取る。この時、乾燥砂のまま試験を行うことから、空気が乾燥している場合は静電気により細粒分がメンブレンに付きやすくなるためよく水で流しとり、砂の流失には十分注意する。

7

試料を乾燥炉に約 24 時間程度放置して炉乾燥させる。

8

炉乾燥終了後、250 μ m、106 μ m、75 μ m の目のふるいを用いてふるい分けを行い、通過質量率を計測する。ふるい分けは自動ふるい機を用いて 30 分間ふるう。

非排水試験過程

今回の試験では一部非排水試験を行った、以下にその過程を記す。なお供試体作成及び排水試験過程 1～3 までは同一の工程を行う。

1

供試体が水で満たされ、拘束圧 20kPa とした後に、供試体の下側に通じるバルブから二酸化炭素を注入し、供試体上部から排出する。この作業は、供試体の飽和度を高めるために行うものであり、30 分間行う。この間に、真空ポンプを用いて、制御盤上部のタンクの水を-100 kPa の真空で引き脱気水を作成しておく。

2

二酸化炭素の注入が終了した後、供試体の下部ラインを制御盤上部の脱気水タンクと接続し、供試体に脱気水を注入・飽和させる。この時、初期段階では、上部からは供試体内の空気が気泡として出ている段階ではバルブは半開とし、急激な脱気水の注入による不飽和を防ぐ。供試体内の空気がすべて排出され注入している脱気水が排出されたらバルブを全開にして飽和させる。この工程は 30 分ほど行う。

3

供試体の飽和が終了した後、脱気水タンクとの接続を切り、ビュレットと供試体上下を接続する。なお、ビュレットの目盛りは後の操作で上下するため、20mm ほどにあらかじめ調整してあることが望ましい。

4

供試体の飽和度を確かめるために、B 値（飽和度）チェックを行い飽和度が 96% 以上であることを確かめる。

なお、上記 1～4 の工程を排水試験過程 3 と 4 の間におこなうことで、飽和砂の排水試験を行うことが可能である。

5

ビュレットの読みを記録した後、バルブはすべて解放した状態で拘束圧を（所定の値＋間隙圧の値）まで上昇させ圧密を 30 分間行う。

6

圧密終了後、ビュレットの変化と鉛直方向変位を記録し、供試体上下のバルブ②④を閉じてせん断を行う。

7

せん断終了後、ビュレットを真空で引き-10 kPa とする。セル圧を減少させセル水を排出してからセルを上るその後、鉛直軸とキャップの接続を解き、供試体表面を手で叩く、あるいは揉んで供試体内の間隙水の絞り出しを行う。十分に間隙水が絞り出されたら間隙圧を-20kPa まで上げ、供試体上下バルブを閉じる。

8

メンブレンの取り外しは供試体上部からおこなう。これは内部に負圧がはたらいっている状況で径の細い配管から取り外すと内部に残留している水分が供試体内に引き込まれてしまうことを防ぐためである。

9

取り出した供試体は含水比を測定するために 2 分割してバットへ移す。分け方は供試体の上下と中央部の 2 カ所である。せん断により供試体は端面拘束の影響から上下と中央部で状況が異なっていると考えられるためである。

10

試料を乾燥炉に約 24 時間程度放置して炉乾燥させる。

11

炉乾燥終了後含水比を測定した後、250 μ m、106 μ m、75 μ m の目のふるいを用いてふるい分けを行い、通過質量率を計測する。ふるい分けは自動ふるい機を用いて 30 分間ふるう。

3.3 全試験結果

以下表 3.3.1 に、本研究にて行ったすべての試験結果および引用した黄のデータを載せる。また、図 3.3.1～3.3.38 は各試験の応力ひずみ曲線、図 3.3.38～3.3.43 は非排水試験の応力ひずみ曲線・応力経路図である。

表 3.3.1 すべての試験結果および引用した黄のデータ

乾燥排水	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_0(\text{kPa})$	備考
TCB001	豊浦砂	—	—	—	—	—	
TCB002	豊浦砂	0.0012	114.6	0.818	10	100	三軸装置使用
TCB003	豊浦砂	0.0013	72.2	0.712	5	100	三軸装置使用
TCB004	豊浦砂	—	—	—	2.5	—	
TCB005	豊浦砂	0.0006	147	0.785	40	1000	
TCB006	豊浦砂	0.0049	734	0.744	40	500	
TCB007	豊浦砂	0.0111	1128	0.759	40	800	
TCB008	豊浦砂	0.0022	462	0.762	40	300	
TCB009	豊浦砂	0.0716	3662	0.743	40	3000	
TCB010	豊浦砂	0.0156	1392	0.736	40	1000	
TCB011	豊浦砂	0.0420	2650	0.747	40	2000	
TCB012	豊浦砂	0.0725	3976	0.625	40	3000	
TCB013	豊浦砂	0.0566	2906	0.699	30	3000	
TCB014	豊浦砂	0.1002	4651	0.735	40	4000	
TCB015	豊浦砂	0.0777	3568	0.718	30	4000	
乾燥排水	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_0(\text{kPa})$	備考
HTCiide001	飯豊砂7号	0.0376	1726	0.765	20	3000	
HTCiide002	飯豊砂7号	0.0785	3572	0.753	40	3000	
HTCiide003	飯豊砂6号	—	—	—	—	—	
HTCiide004	飯豊砂6号	—	—	—	—	—	
HTCiide005	飯豊砂6号	0.0475	3922	0.631	41	3000	
HTCiide006	飯豊砂6号	0.0234	1905	0.638	20	3000	
HTCiide007	飯豊砂5号	0.0281	3552	0.539	36	3000	
HTCiide008	飯豊砂5号	0.0137	2021	0.529	20	3000	
HTCiide009	飯豊砂7号	0.0644	3642	0.76	40	3000	再載荷
HTCiide010	飯豊砂7号	0.0472	2495	0.778	40	2000	

HTCiide011	飯豊砂7号	0.0150	1338	0.783	40	1000	
HTCiide012	飯豊砂7号	0.0354	2712	0.703	40	2000	再載荷
HTCiide013	飯豊砂6号	0.0518	3877	0.627	40	3000	再載荷
HTCiide014	飯豊砂4号	0.0101	2636	0.53	40	2000	
HTCiide015	飯豊砂6号	0.0248	2725	0.618	40	2000	
HTCiide016	飯豊砂6号	0.0244	2670	0.632	40	2000	再載荷
HTCiide017	飯豊砂4号	0.0028	1390	0.559	40	1000	
乾燥排水	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_0(\text{kPa})$	備考
Hgifu001	岐阜砂7号	0.1256	3505	0.832	40	3000	
Hgifu002	岐阜砂7号	0.0410	1367	0.851	40	1000	
Hgifu003	岐阜砂6号	0.1106	3643	0.783	40	3000	
Hgifu004	岐阜砂6号	0.0366	616	0.841	40	1000	
Hgifu005	岐阜砂6号	0.0378	1416	0.814	40	1000	
Hgifu006	岐阜砂7号	0.0194	742	0.877	40	500	
飽和排水	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_0(\text{kPa})$	備考
DHTC001	豊浦砂	—	—	—	—	—	
DHTC002	豊浦砂	0.0659	2796	0.751	30	3000	
DHTC003	豊浦砂	0.0355	1276	0.780	20	3000	
DHTC004	豊浦砂	0.0772	3551	0.729	40	3000	
DHTC005	豊浦砂	0.0792	3589	0.746	40	3000	
非排水条件	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_0(\text{kPa})$	備考
UHTC001	豊浦砂	—	—	—	—	—	
UHTC002	豊浦砂	0.0288	2570	0.811	25	3000	試験手順ミス
UHTC003	豊浦砂	0.0466	5016	0.809	39	3000	試験手順ミス
UHTC004	豊浦砂	0.0108	1126	0.810	10	3000	
UHTC005	豊浦砂	0.0452	2388	0.753	40	3000	
UHTC006	豊浦砂	0.0225	1214	0.769	20	3000	

乾燥排水	使用した試料	FC	W(kPa)	e	$\varepsilon(\%)$	$p'_o(\text{kPa})$	備考
htc250	豊浦砂	0.0493	2191.0	0.820	20	4000	黄のデータ
htc084	豊浦砂	0.0463	1768.0	0.775	15	4000	黄のデータ
htc107	豊浦砂	0.0207	922.0	0.788	10	4000	黄のデータ
htc257	豊浦砂	0.0107	450.0	0.789	5	4000	黄のデータ
htc074	豊浦砂	0.0000	0.00	0.803	0	4000	黄のデータ
htc253	豊浦砂	0.0398	1820.0	0.797	20	3000	黄のデータ
htc088	豊浦砂	0.0290	1254.0	0.790	15	3000	黄のデータ
htc108	豊浦砂	0.0161	776.0	0.740	10	3000	黄のデータ
htc258	豊浦砂	0.0071	356.0	0.795	5	3000	黄のデータ
htc078	豊浦砂	0.0000	0.00	0.765	0	3000	黄のデータ
htc082	豊浦砂	0.0214	1197.0	0.775	20	2000	黄のデータ
htc092	豊浦砂	0.0073	776.0	0.737	15	2000	黄のデータ
htc259	豊浦砂	0.0099	592.0	0.802	10	2000	黄のデータ
htc255	豊浦砂	0.0046	272.0	0.774	5	2000	黄のデータ
htc256	豊浦砂	0.0002	0.00	0.787	0	2000	黄のデータ
htc094	豊浦砂	0.0091	663.0	0.784	20	1000	黄のデータ
htc098	豊浦砂	0.0059	479.0	0.756	15	1000	黄のデータ
htc254	豊浦砂	0.0043	348.0	0.785	10	1000	黄のデータ
htc114	豊浦砂	0.0009	104.0	0.773	5	1000	黄のデータ
htc165	豊浦砂	0.0000	0.00	0.775	0	1000	黄のデータ

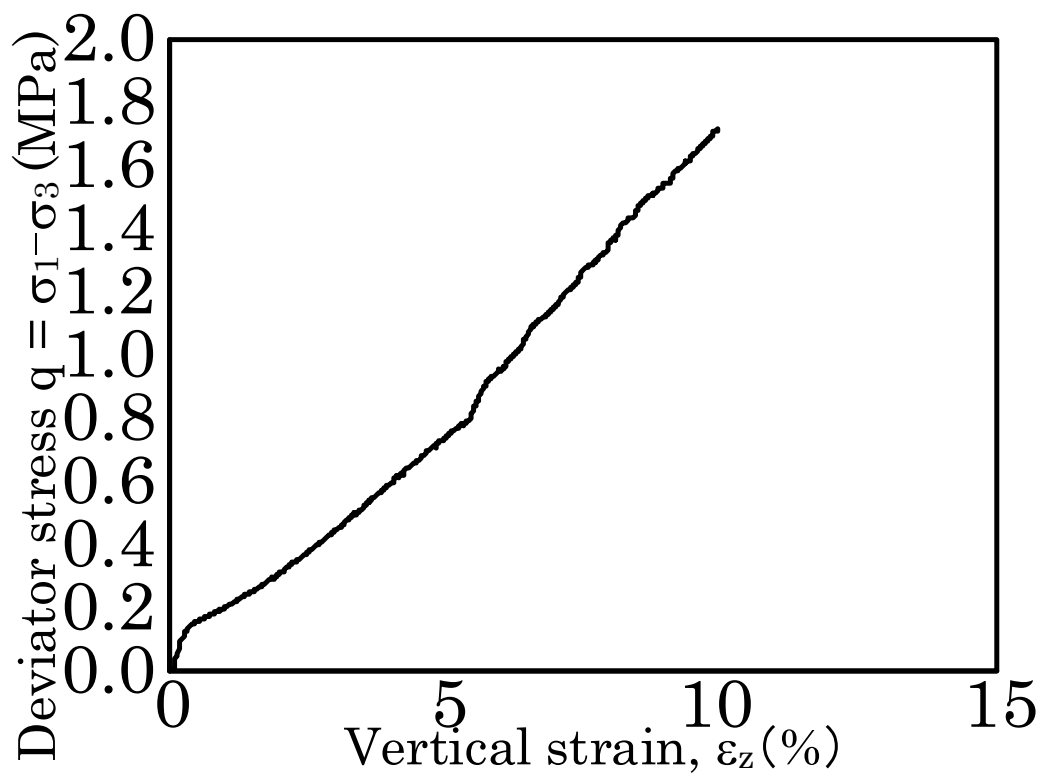


図 3.3.1 TCB002 応力ひずみ曲線

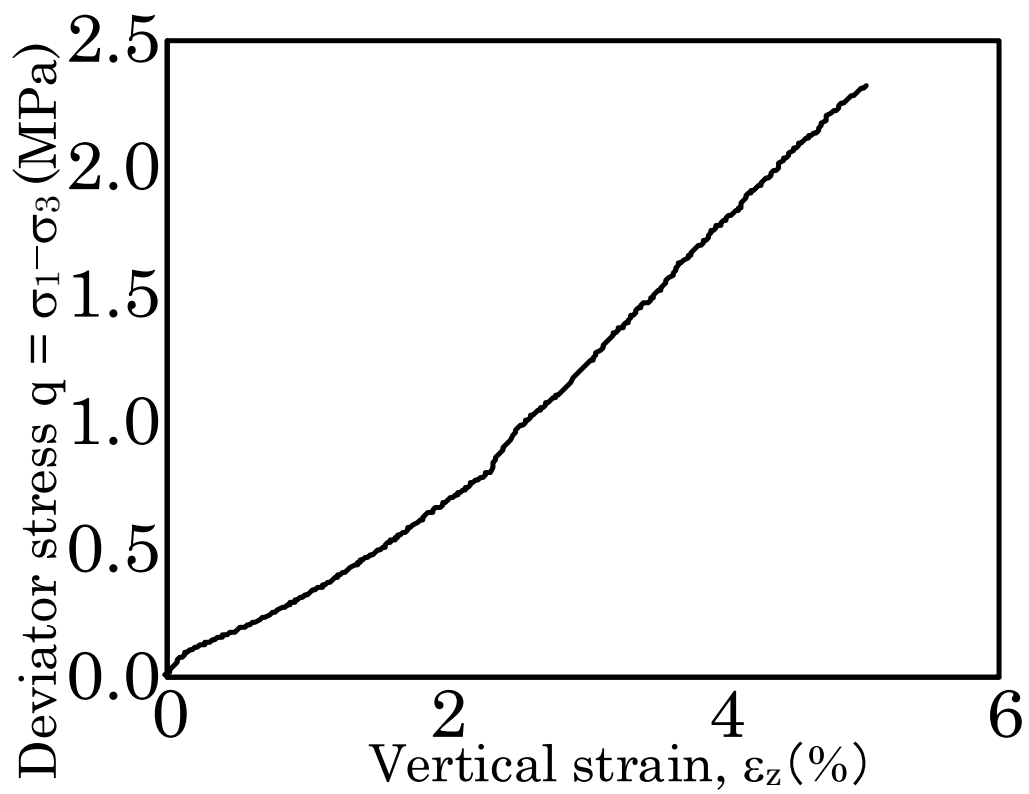


図 3.3.2 TCB003 応力ひずみ曲線

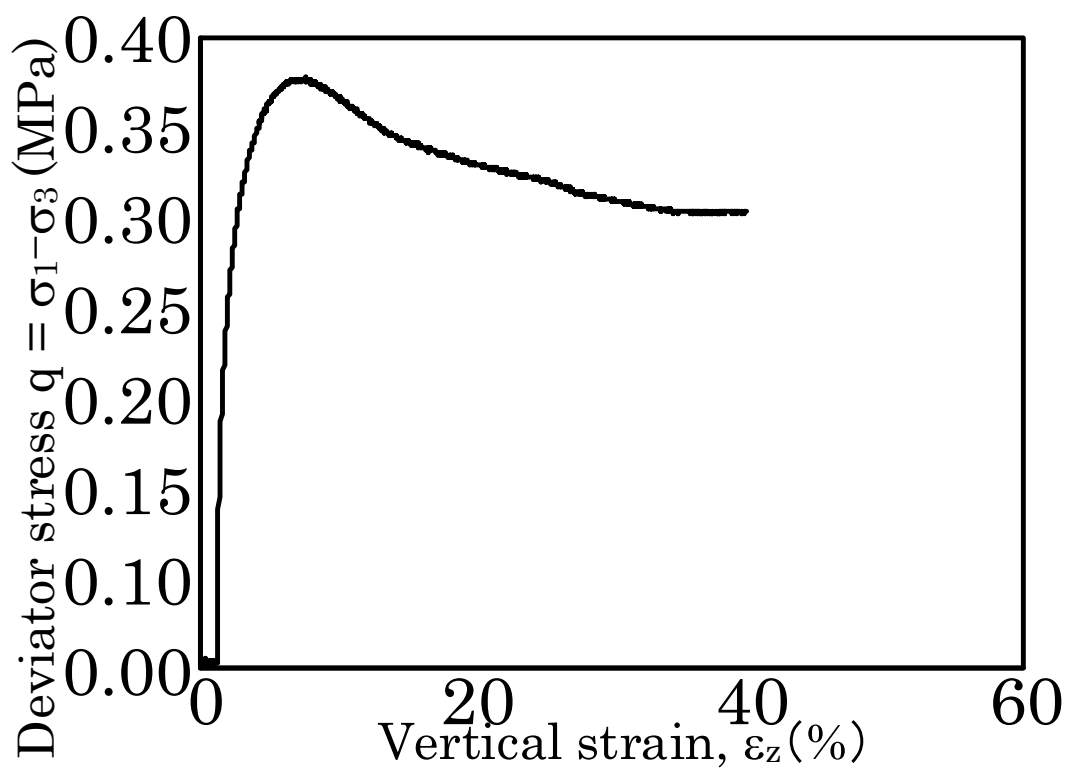


図 3.3.3 TCB005 応力ひずみ曲線

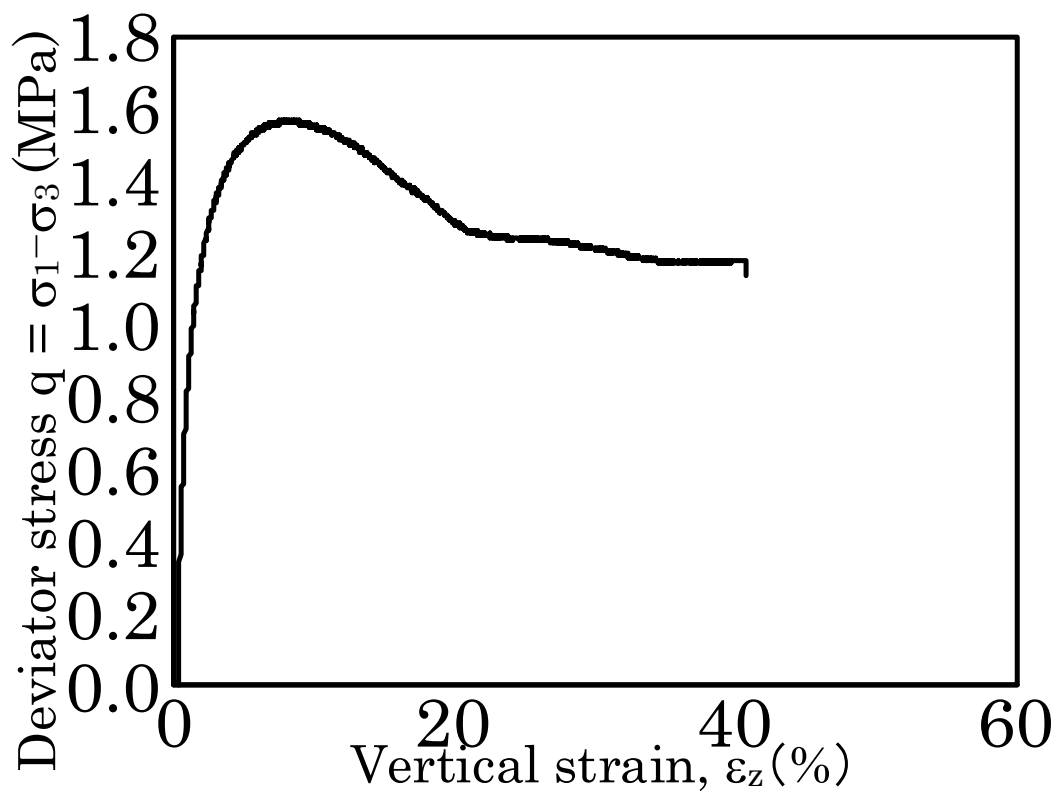


図 3.3.4 TCB006 応力ひずみ曲線

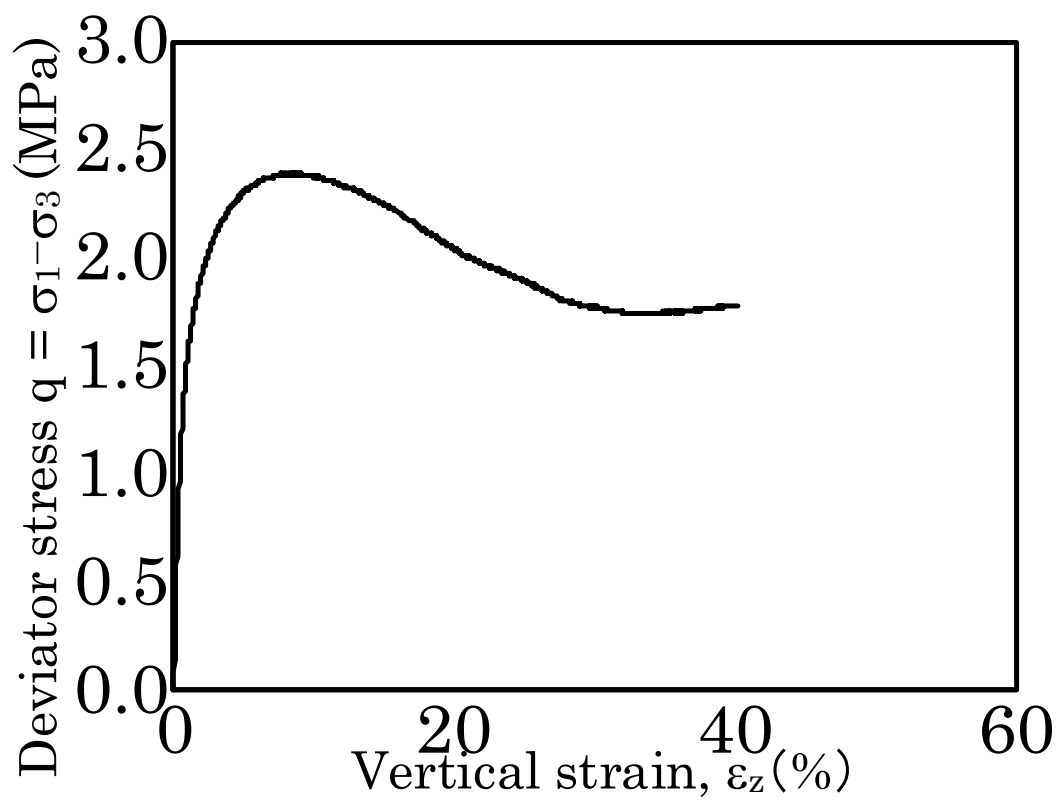


図 3.3.5 TCB007 応力ひずみ曲線

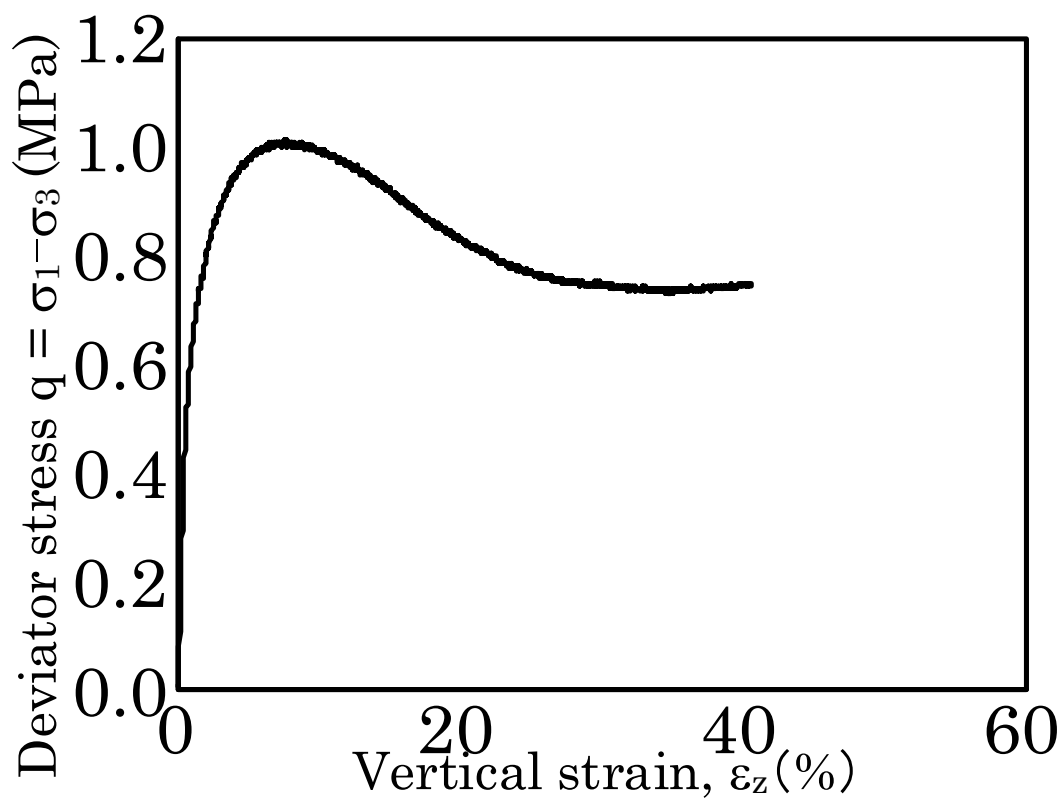


図 3.3.6 TCB008 応力ひずみ曲線

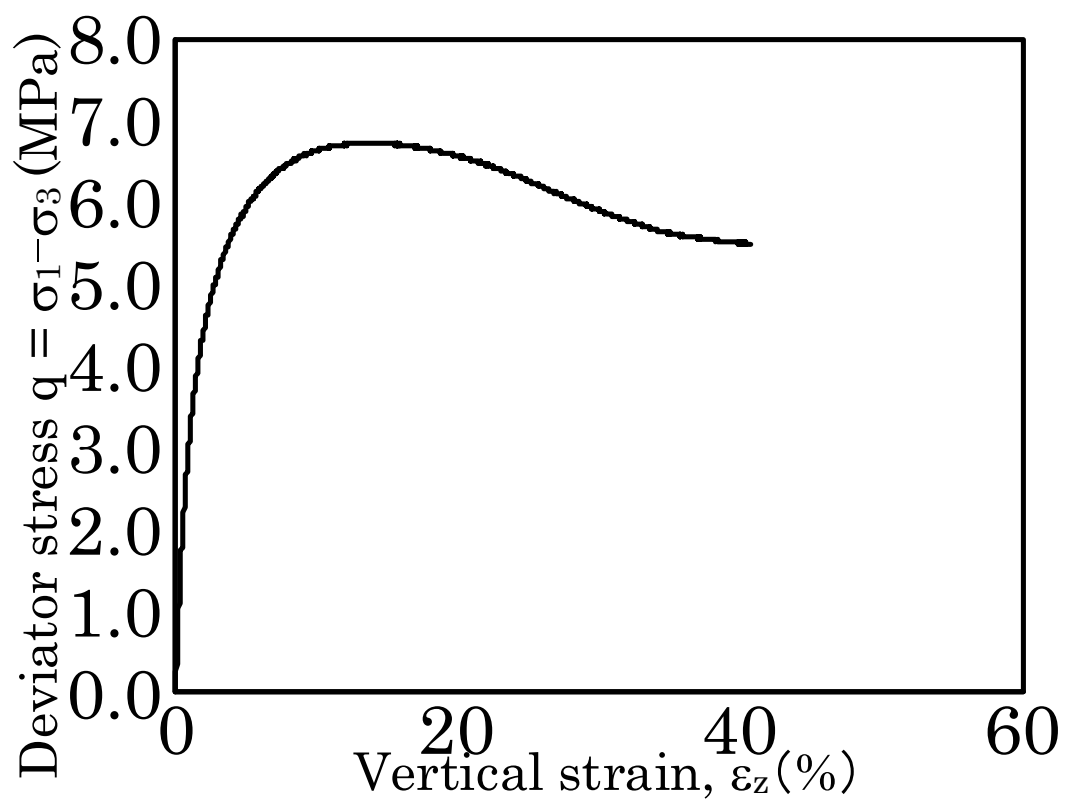


図 3.3.7 TCB009 応力ひずみ曲線

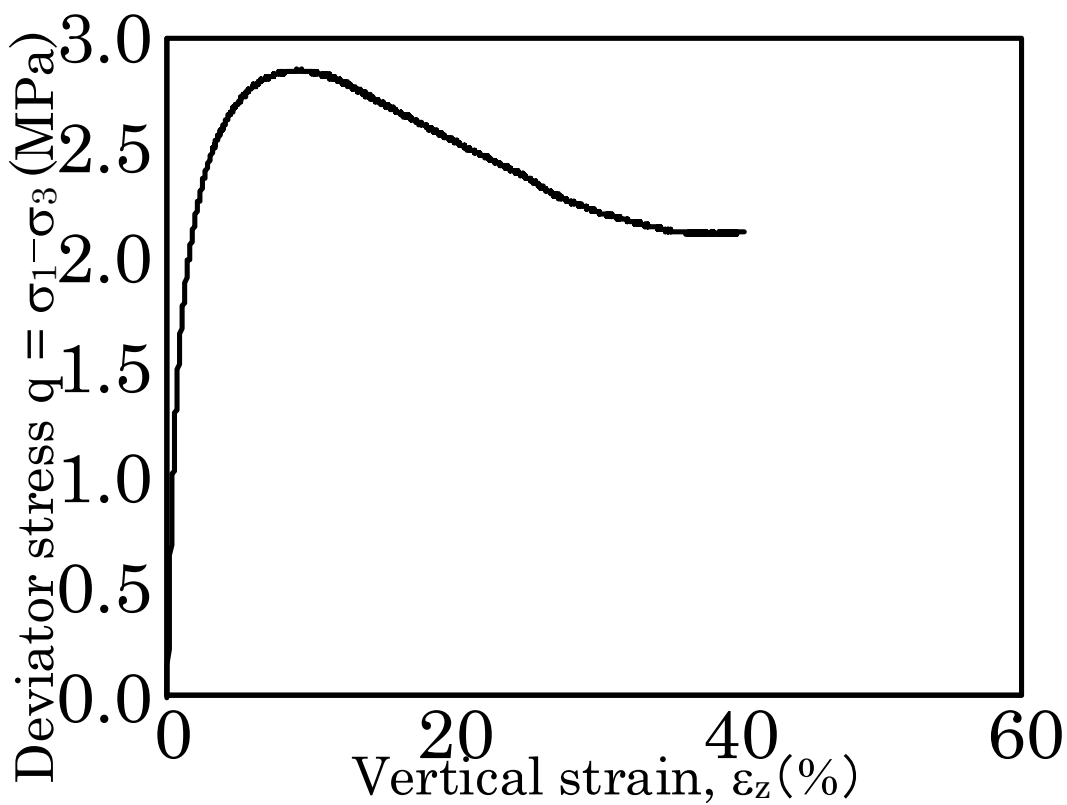


図 3.3.8 TCB010 応力ひずみ曲線

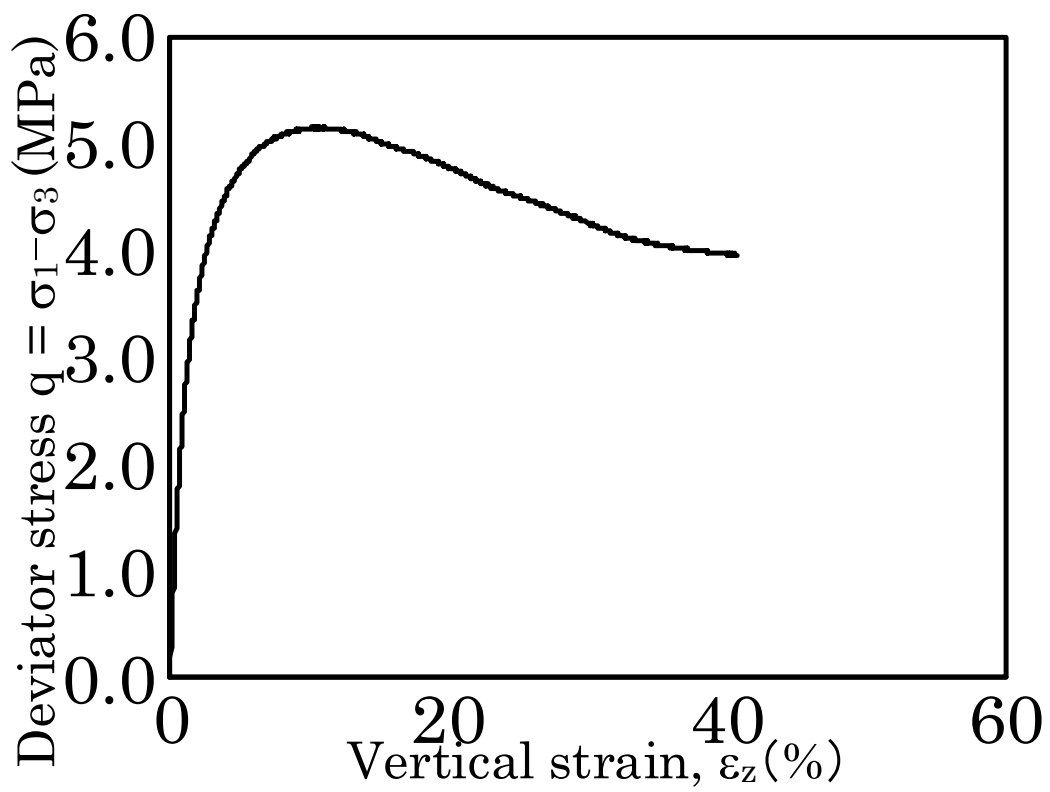


図 3.3.9 TCB011 応力ひずみ曲線

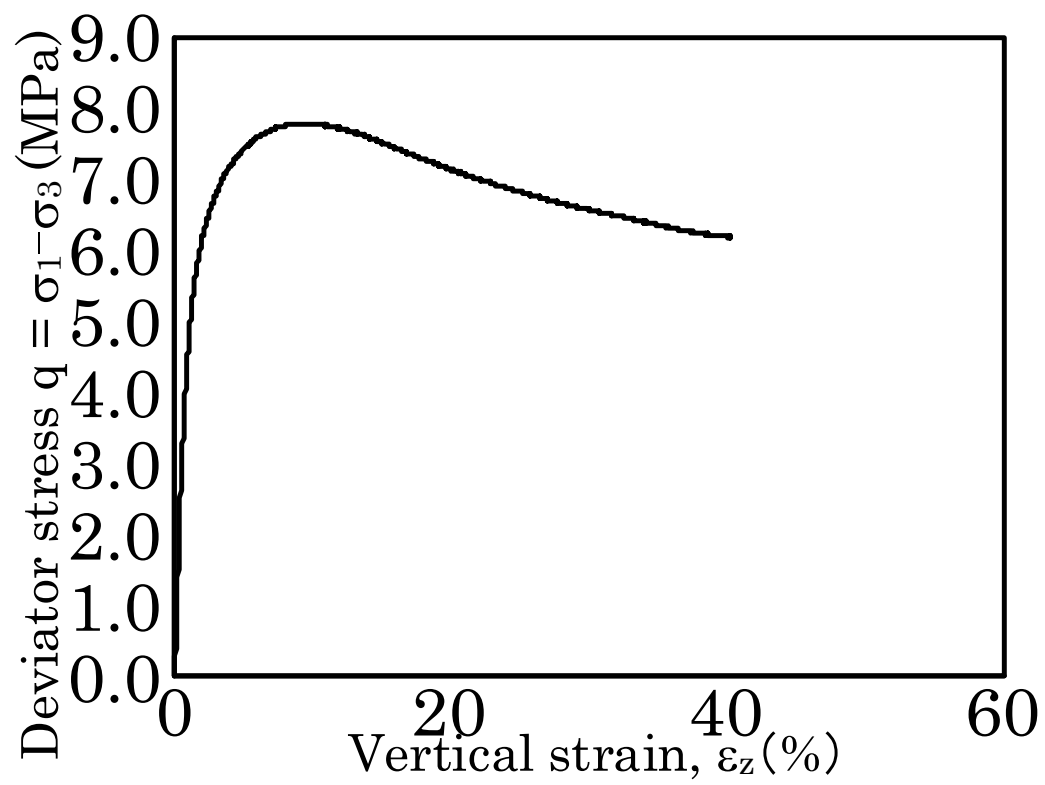


図 3.3.10 TCB012 応力ひずみ曲線

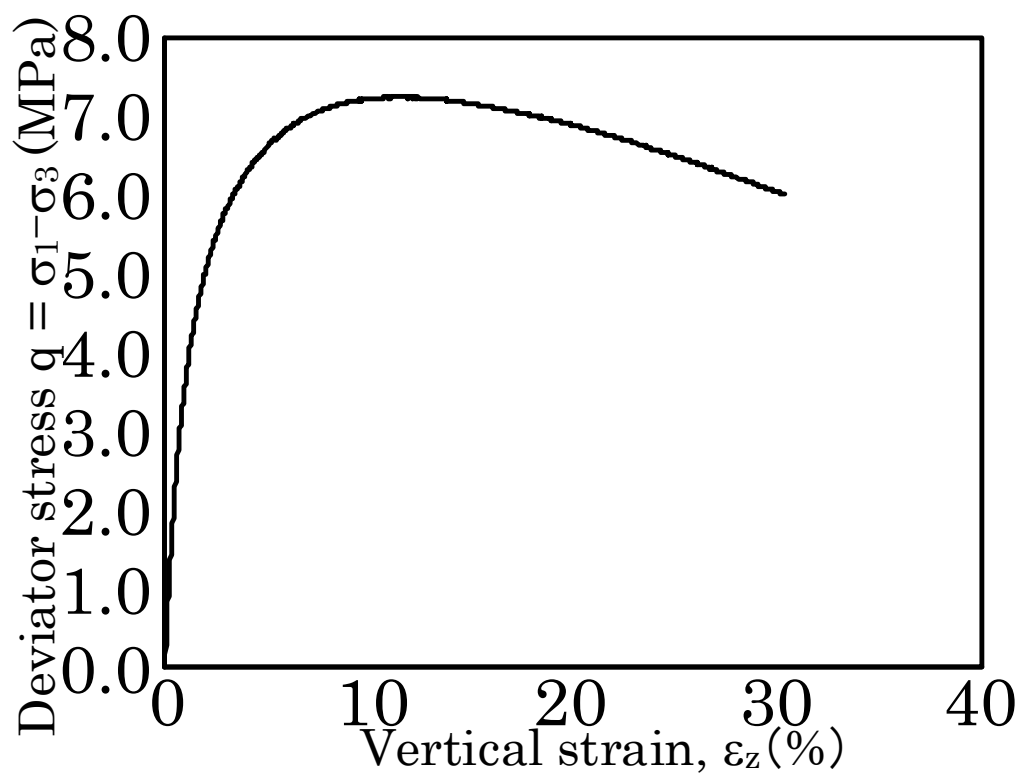


図 3. 3. 11 TCB013 応力ひずみ曲線

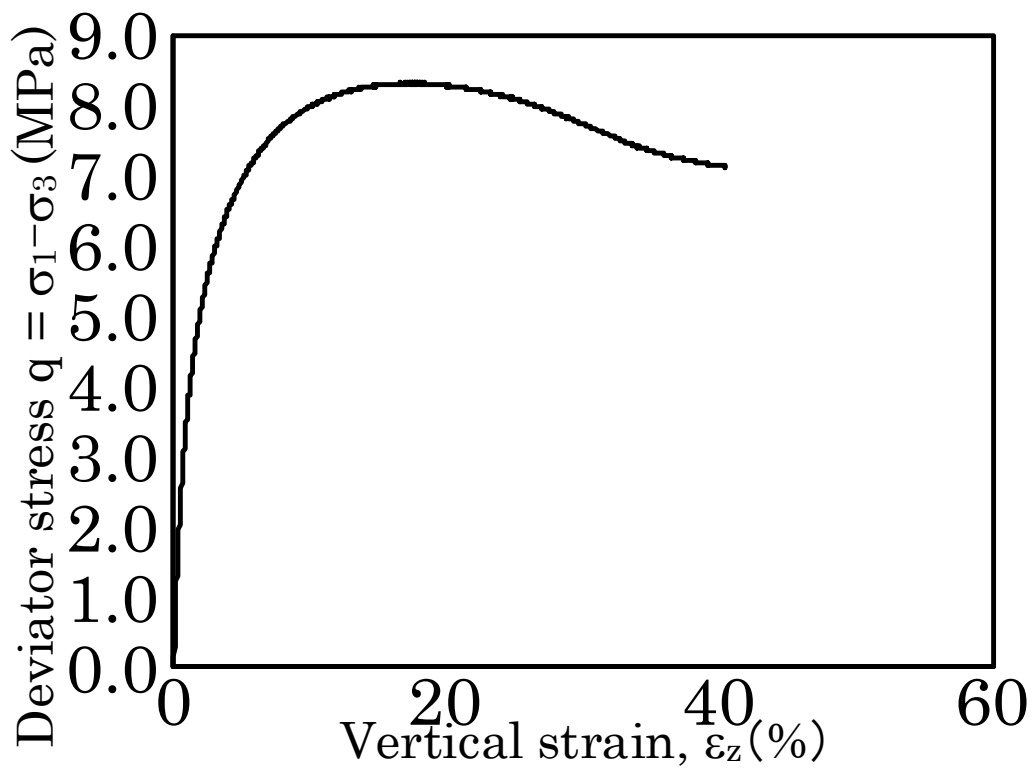


図 3. 3. 12 TCB014 応力ひずみ曲線

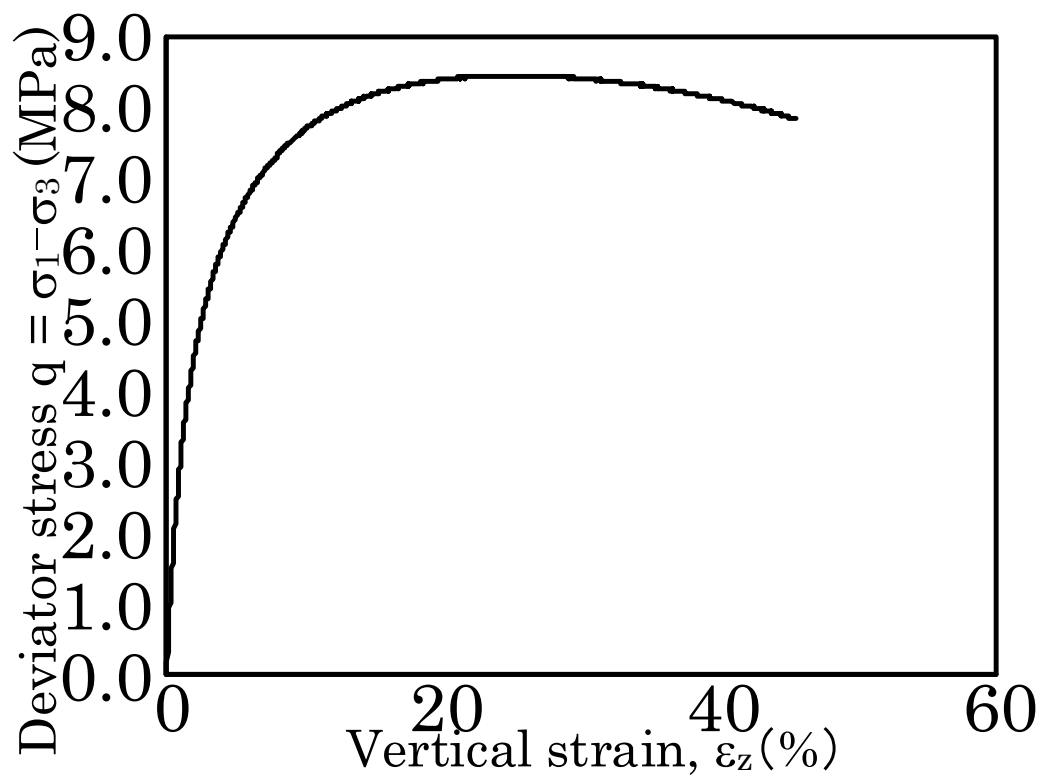


図 3. 3. 13 TCB015 応力ひずみ曲線

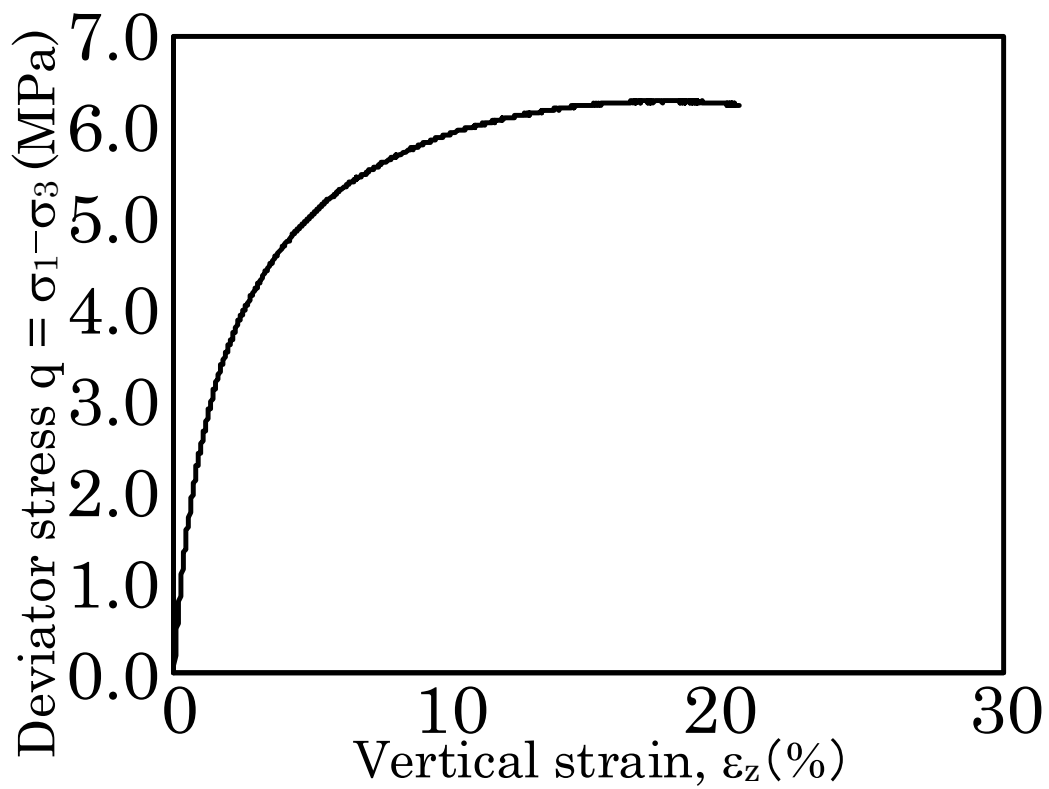


図 3. 3. 14 HTCide001 応力ひずみ曲線

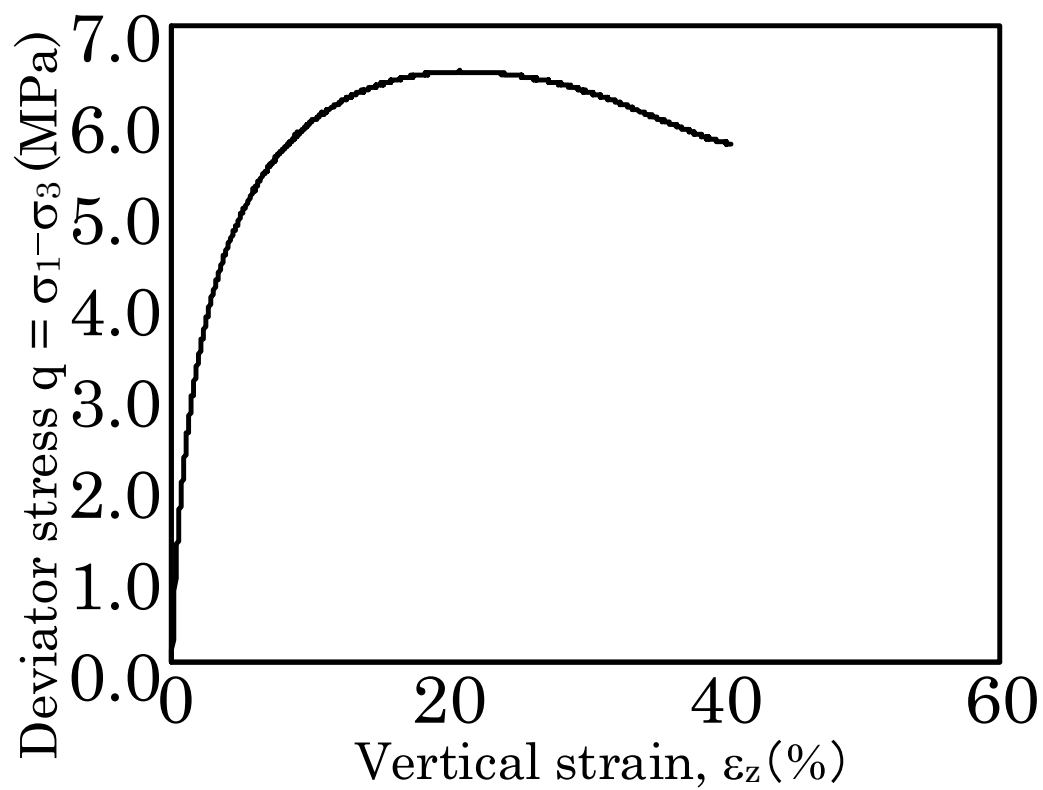


図 3.3.15 HTCiide002 応力ひずみ曲線

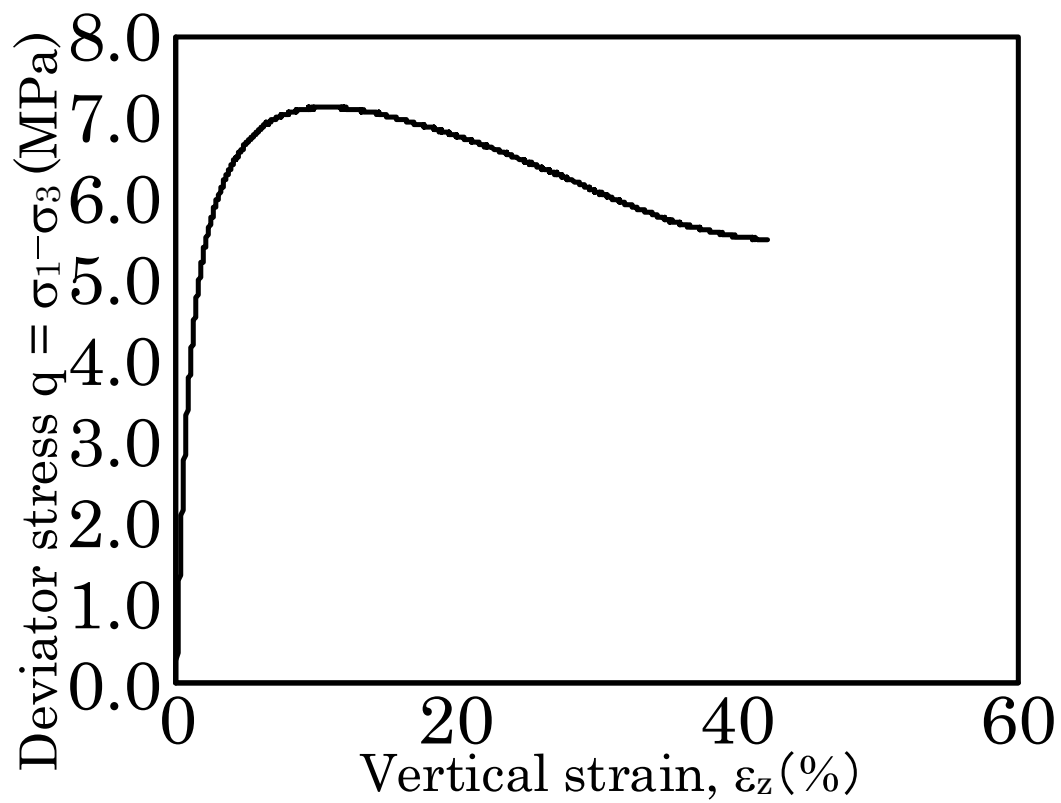


図 3.3.16 HTCiide005 応力ひずみ曲線

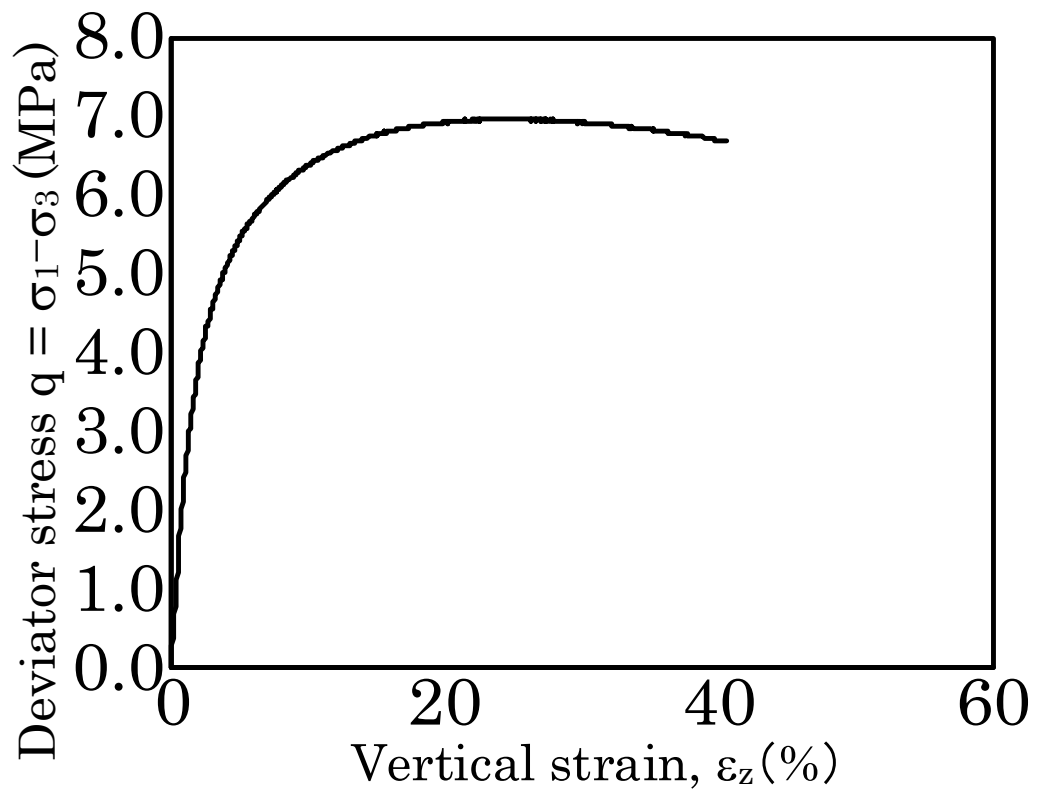


図 3.3.17 HTCiide006 応力ひずみ曲線

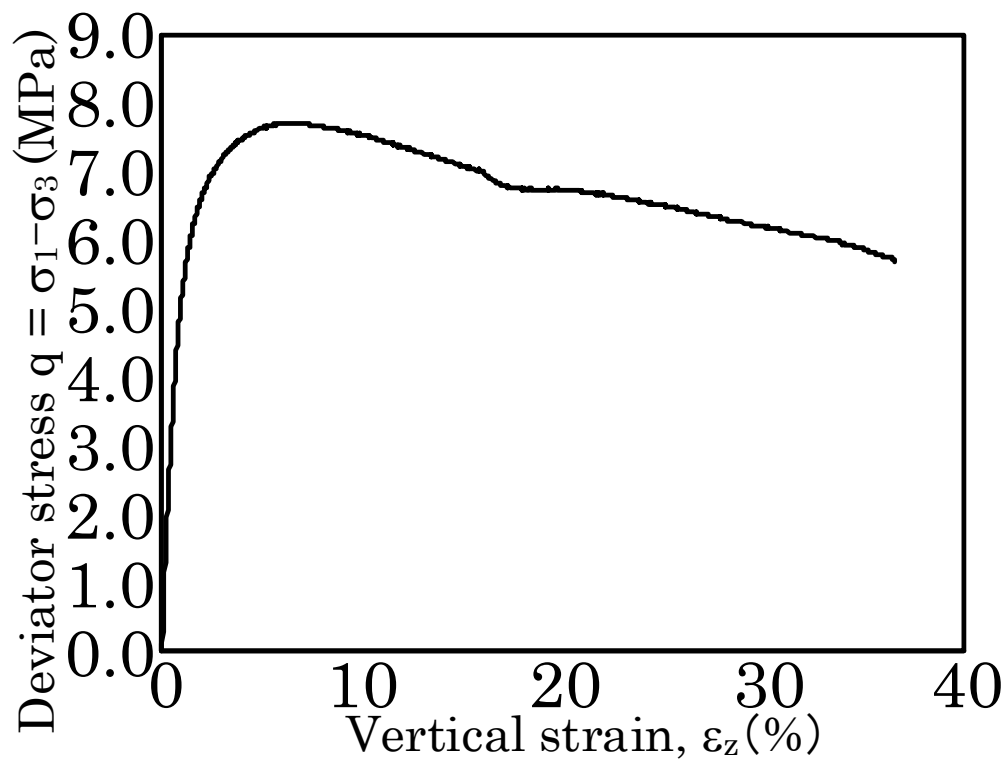


図 3.3.18 HTCiide007 応力ひずみ曲線

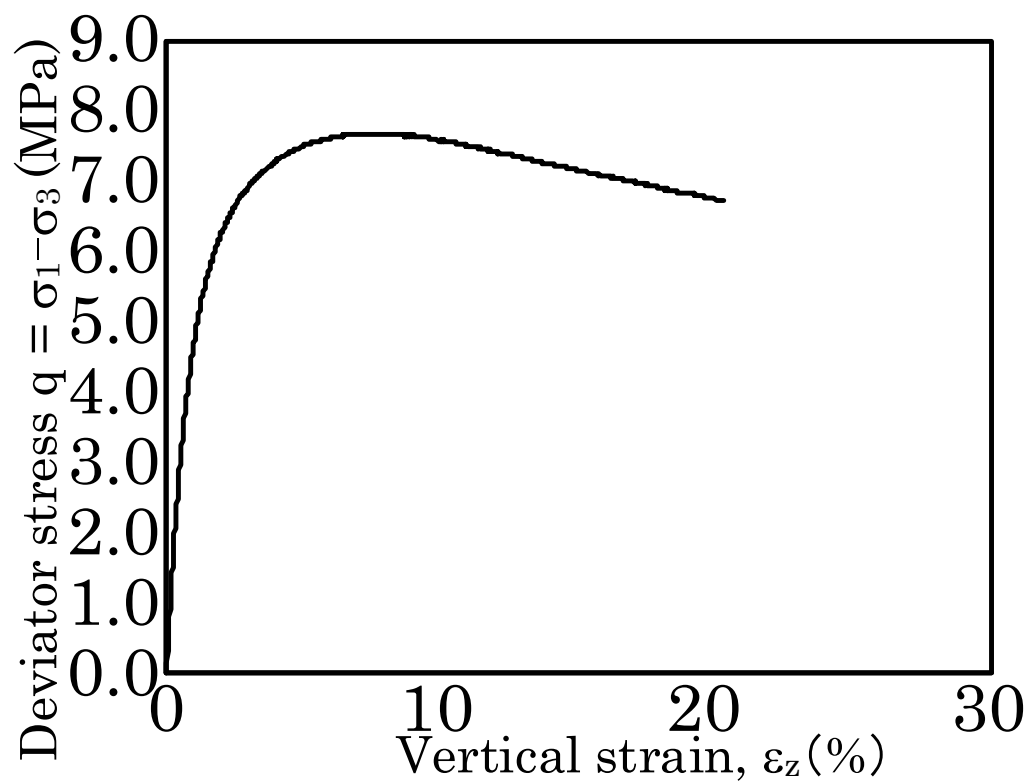


図 3. 3. 19 HTCiide008 応力ひずみ曲線

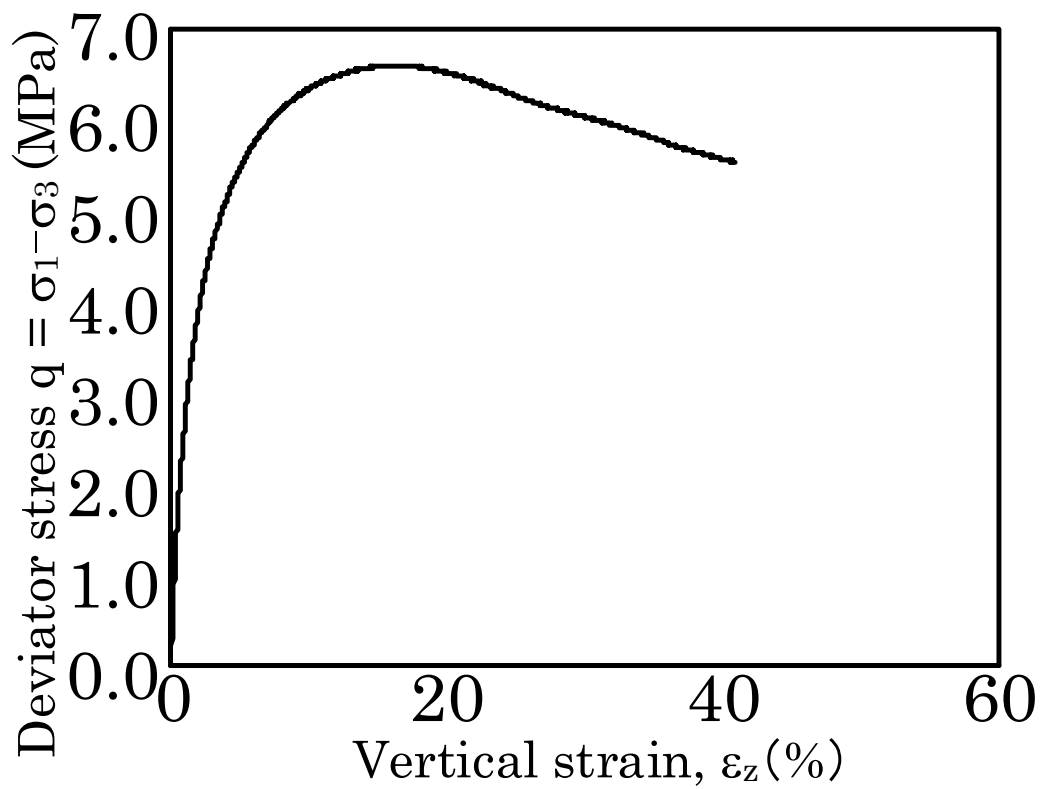


図 3. 3. 20 HTCiide009 応力ひずみ曲線

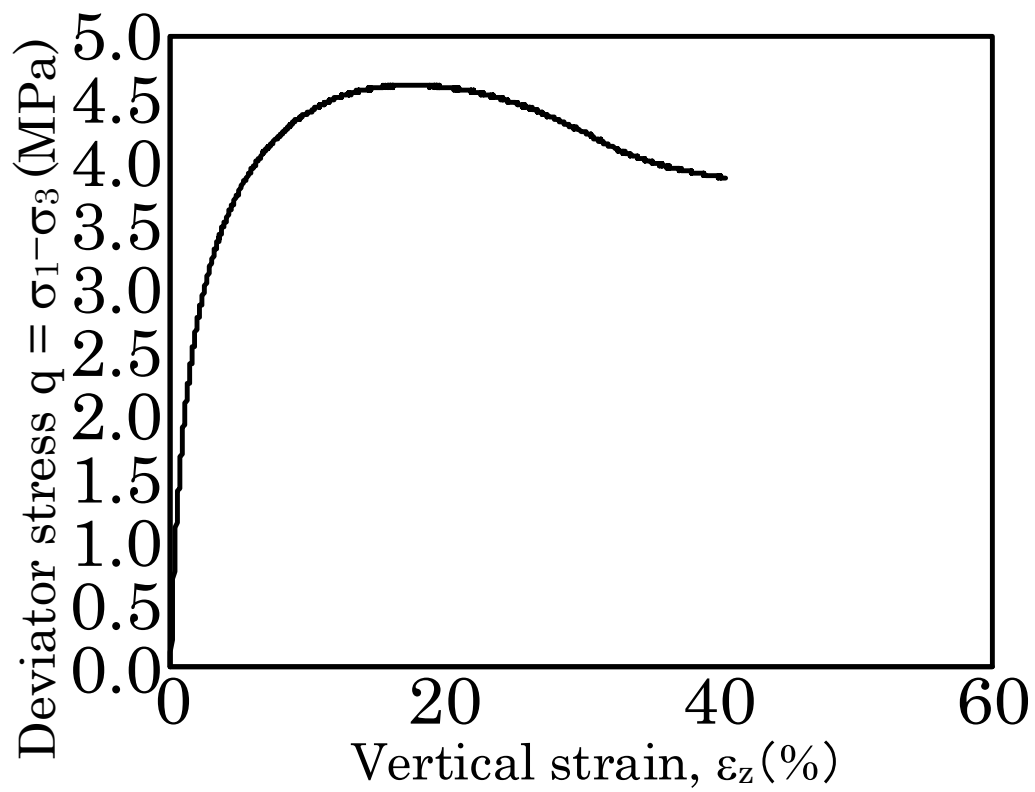


図 3.3.21 HTCiide010 応力ひずみ曲線

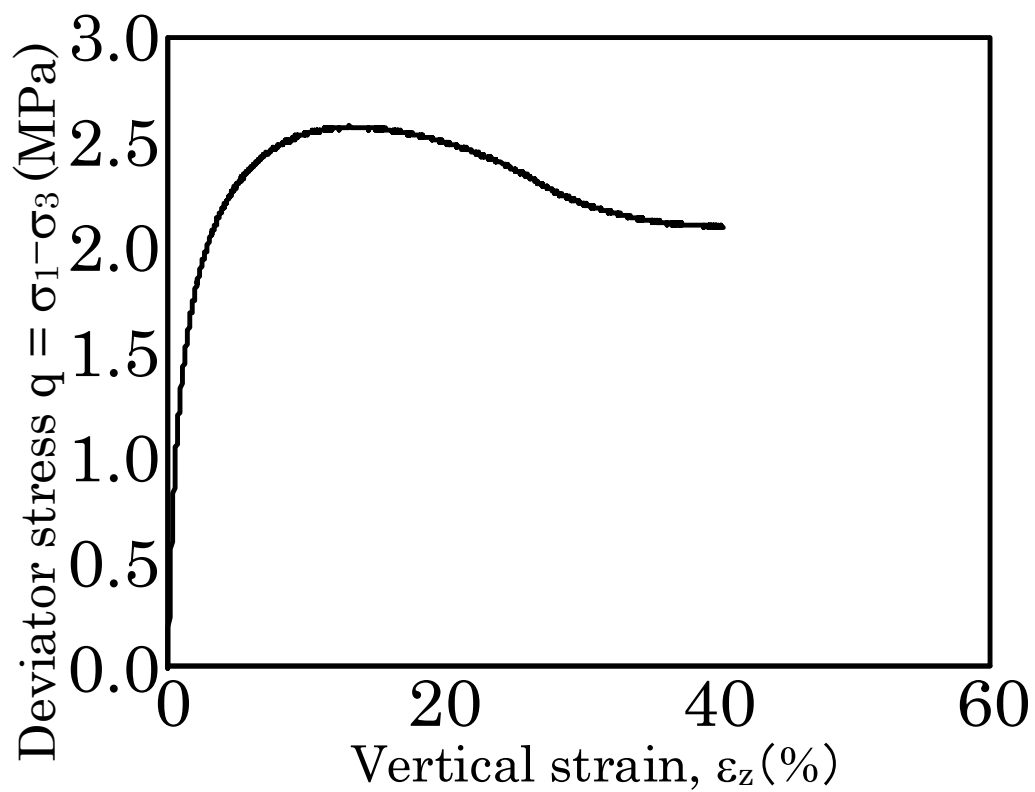


図 3.3.22 HTCiide011 応力ひずみ曲線

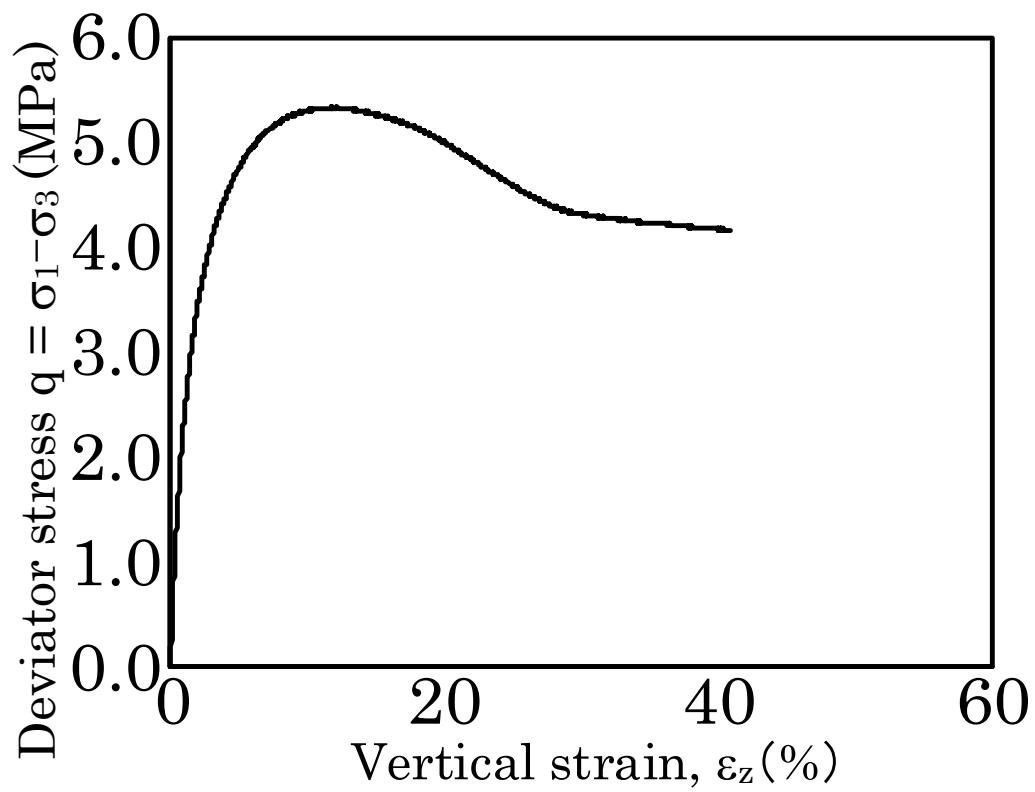


図 3. 3. 23 HTCiide012 応力ひずみ曲線

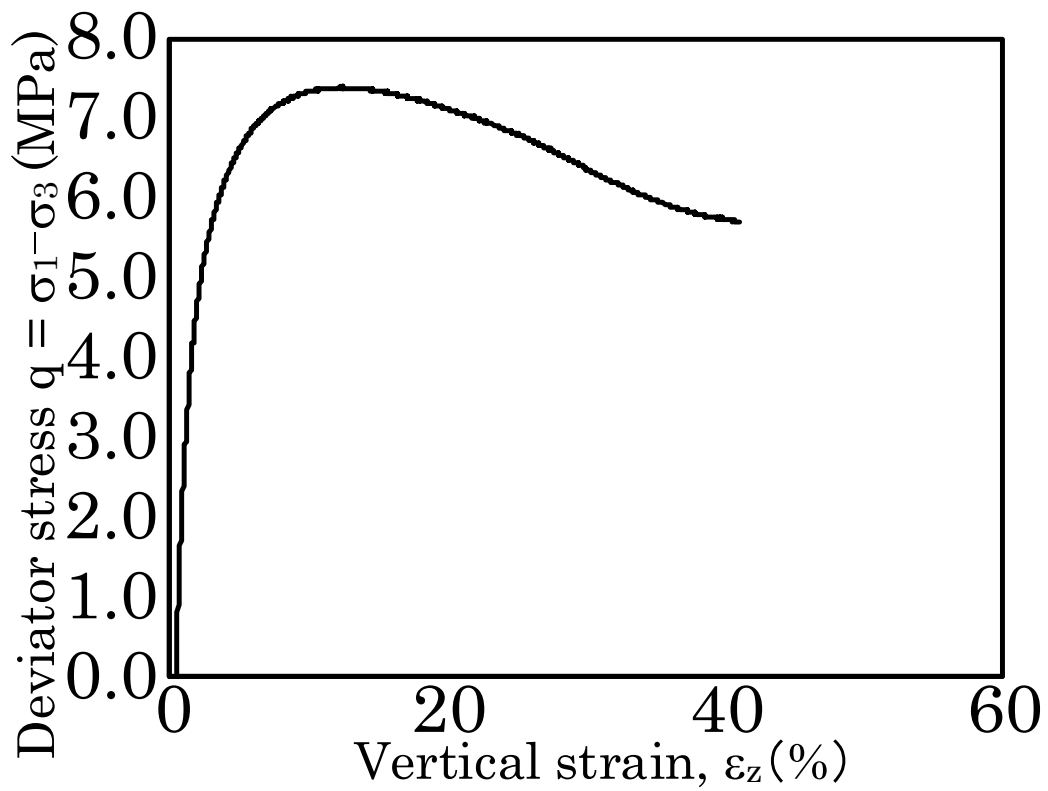


図 3. 3. 24 HTCiide013 応力ひずみ曲線

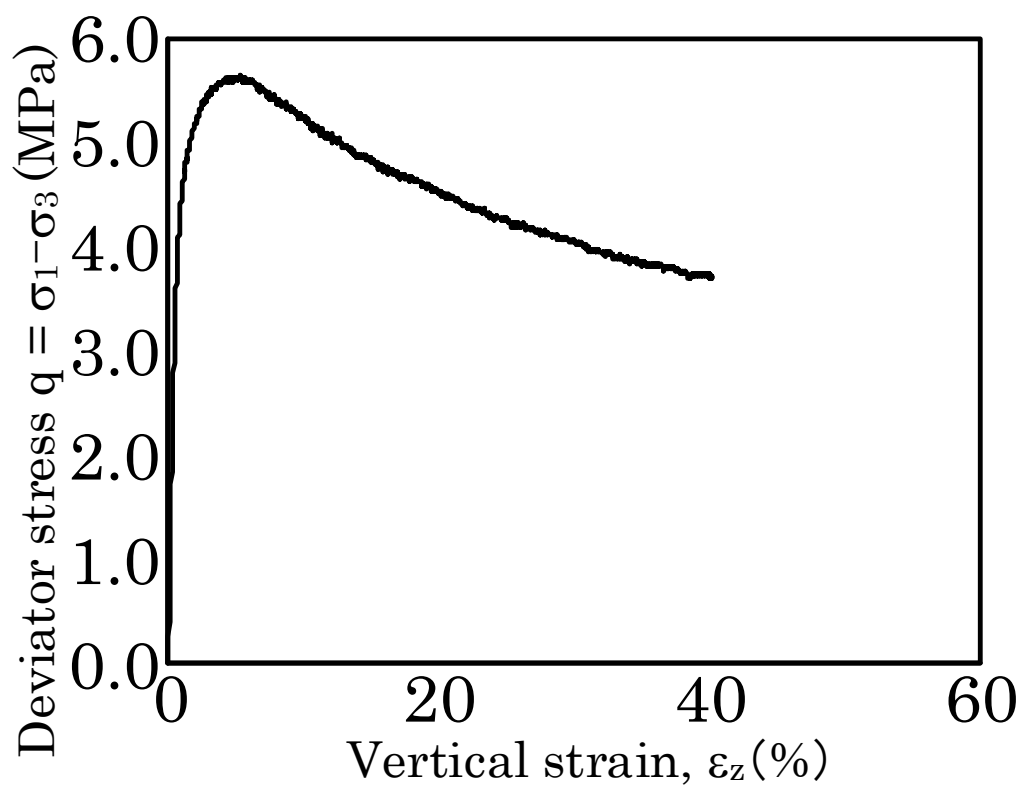


図 3. 3. 25 HTCiide014 応力ひずみ曲線

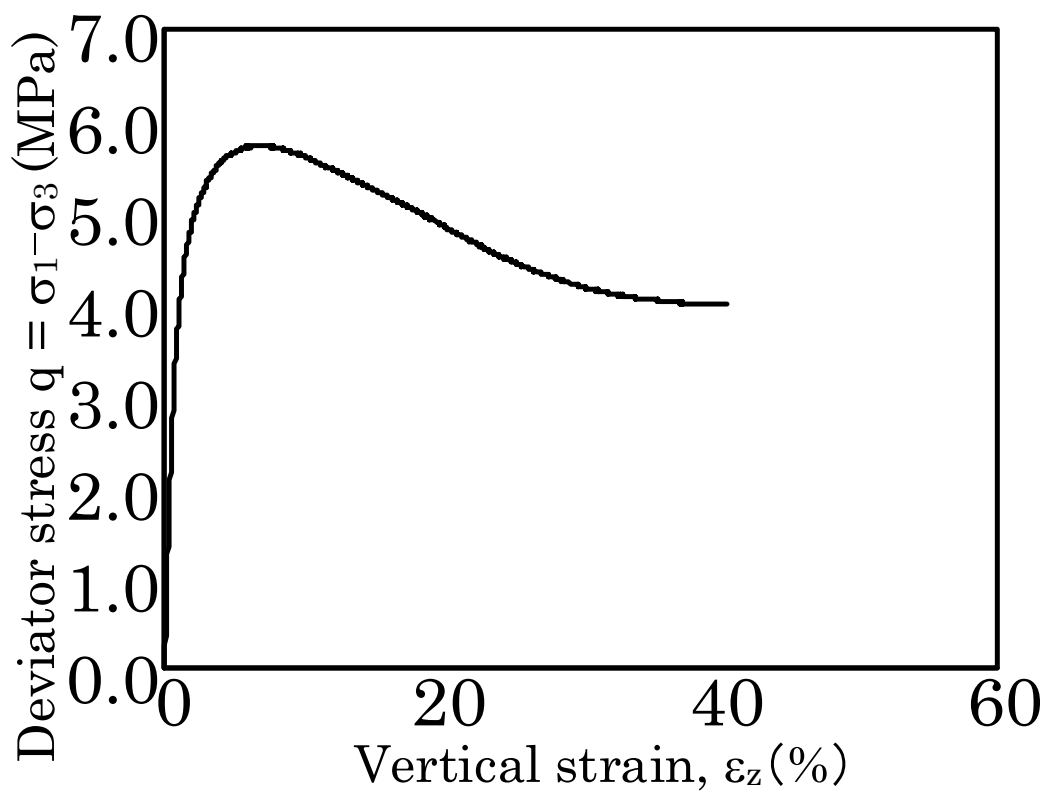


図 3. 3. 26 HTCiide015 応力ひずみ曲線

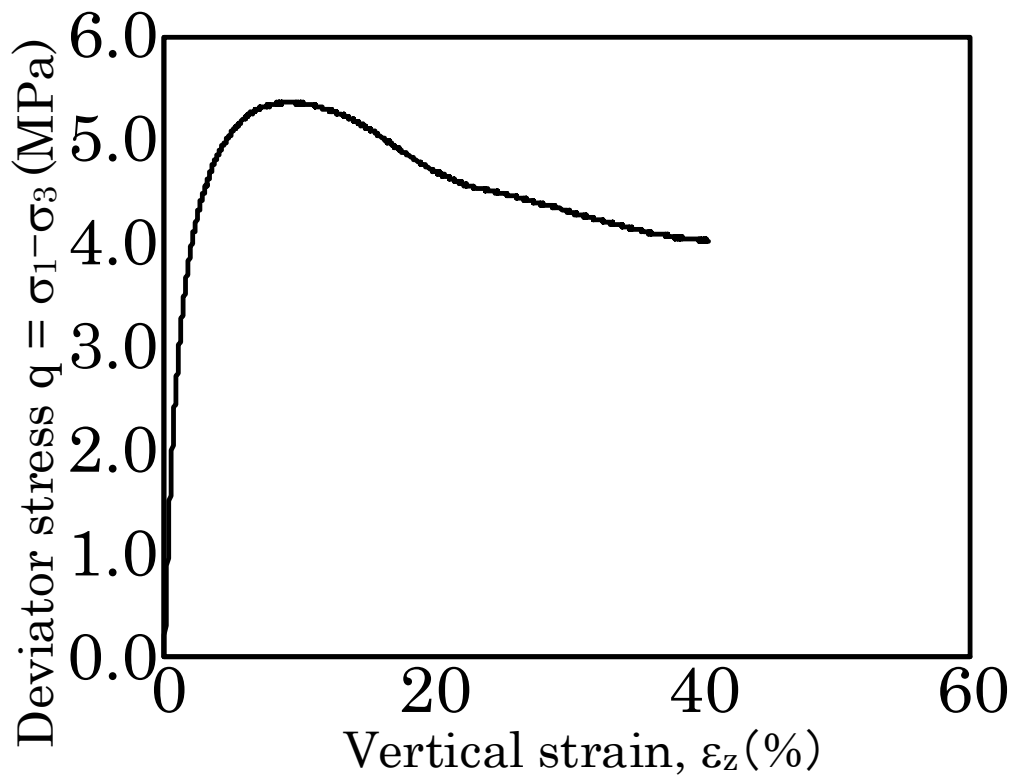


図 3.3.27 HTCiide016 応力ひずみ曲線

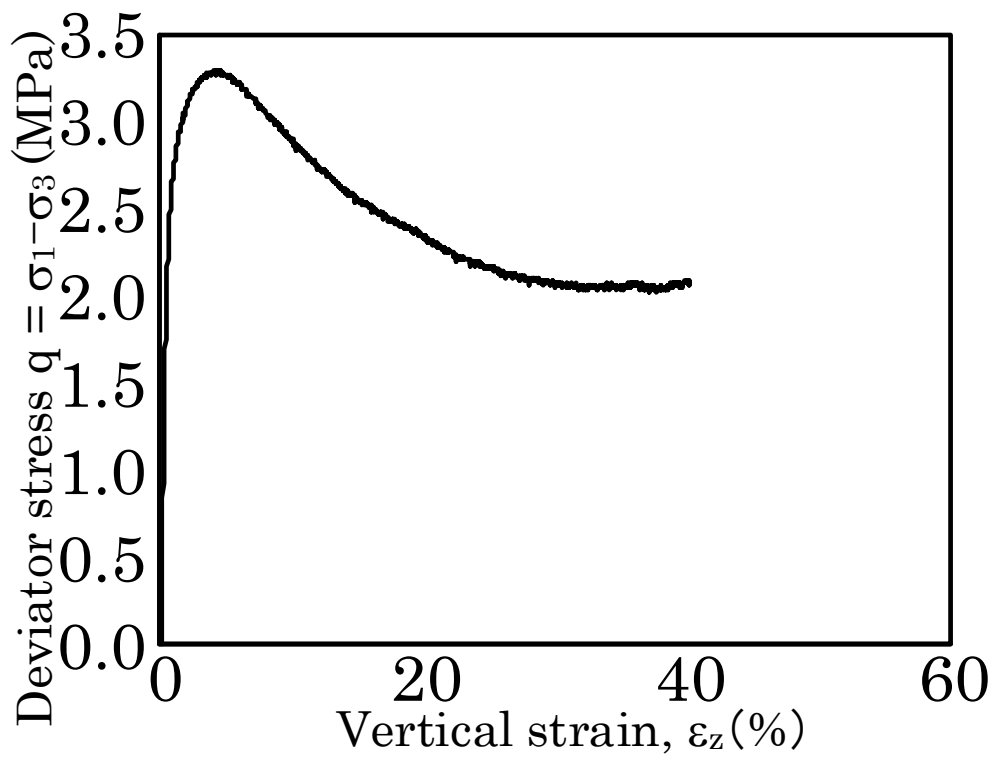


図 3.3.28 HTCiide017 応力ひずみ曲線

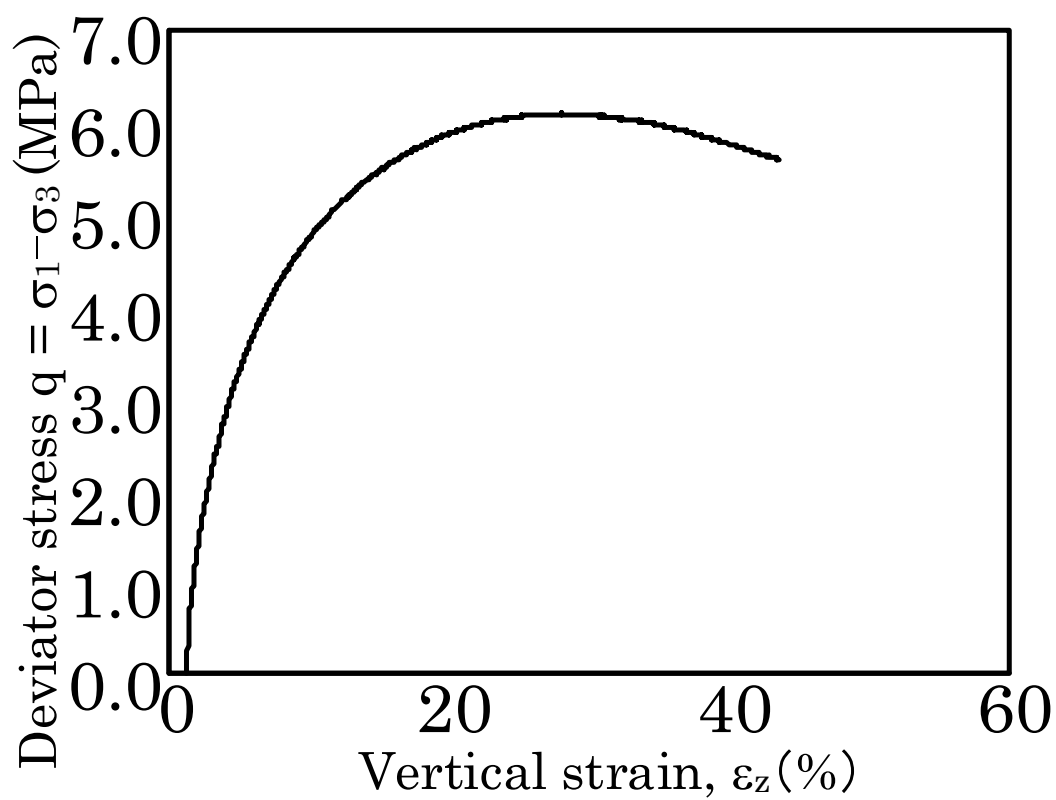


図 3. 3. 29 Hgifu001 応力ひずみ曲線

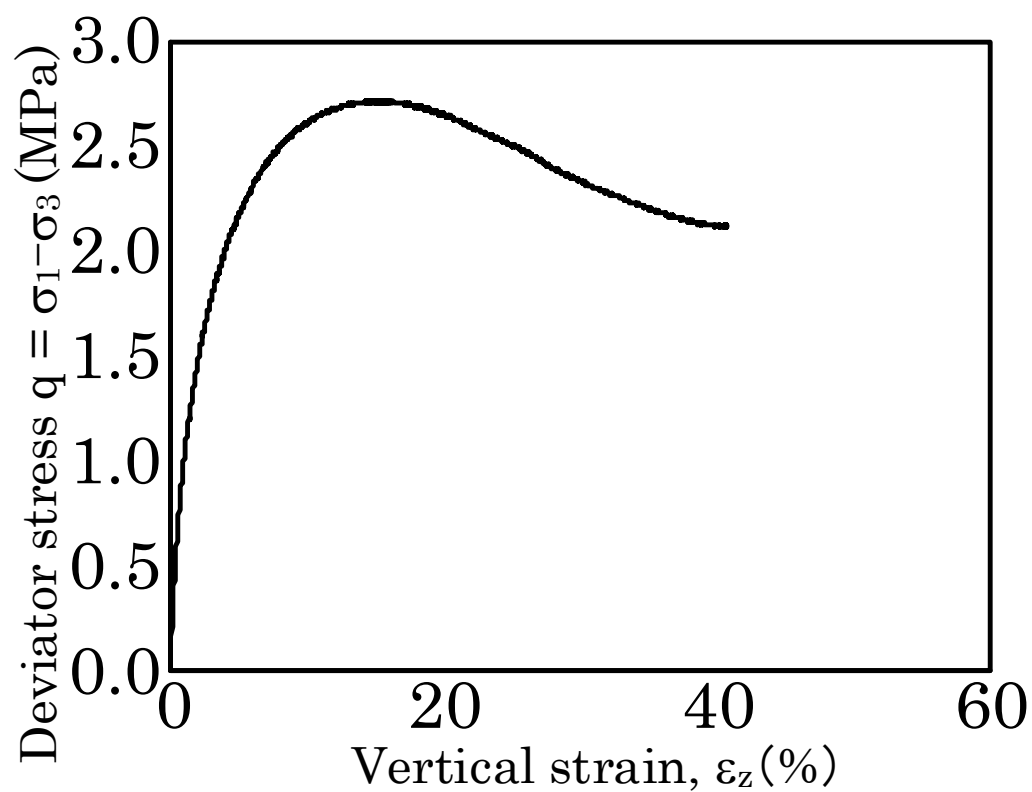


図 3. 3. 30 Hgifu002 応力ひずみ曲線

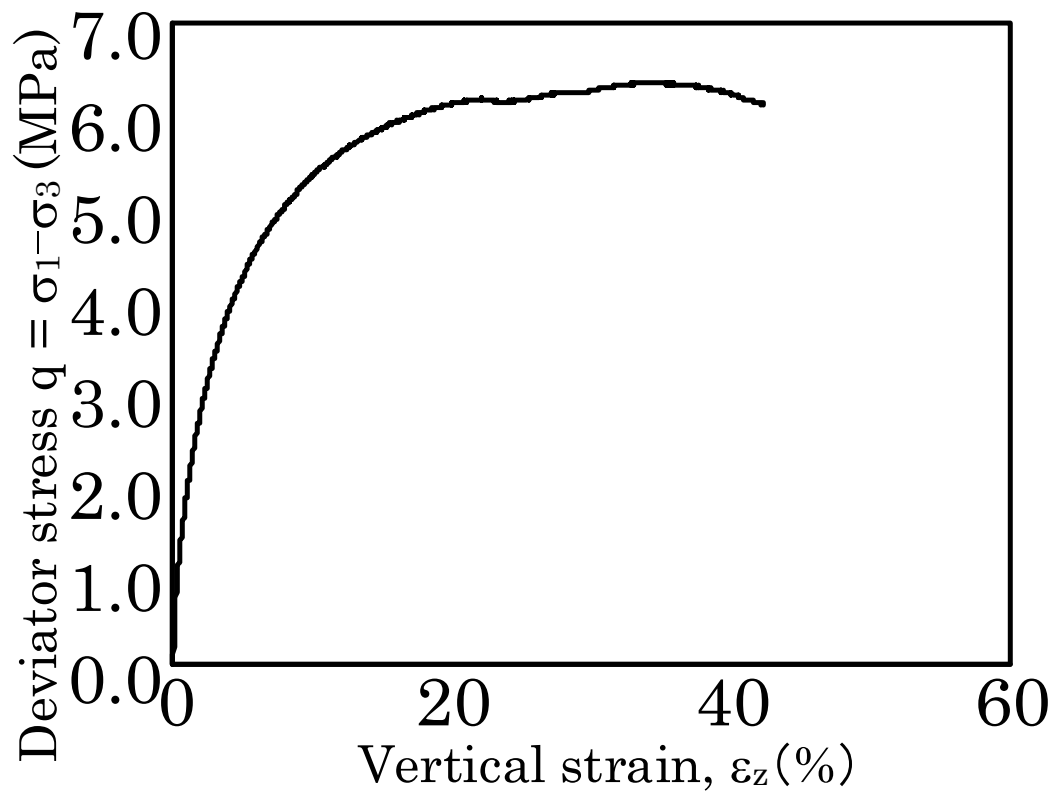


図 3. 3. 31 Hgifu003 応力ひずみ曲線

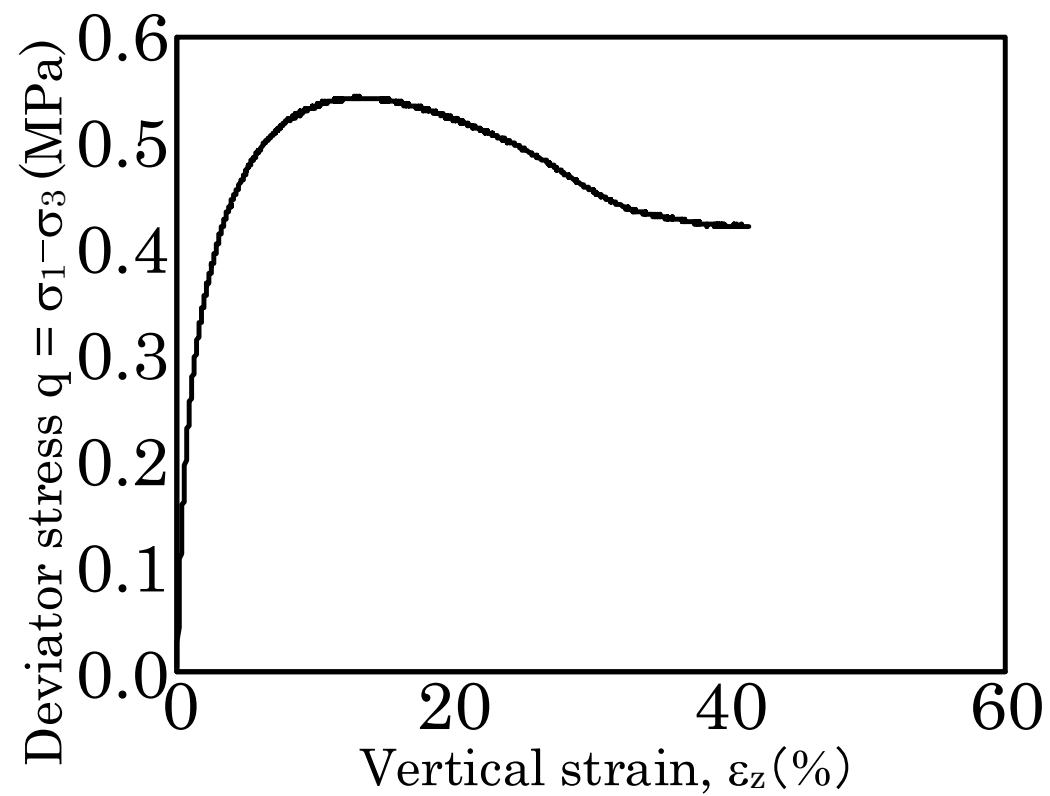


図 3. 3. 32 Hgifu004 応力ひずみ曲線

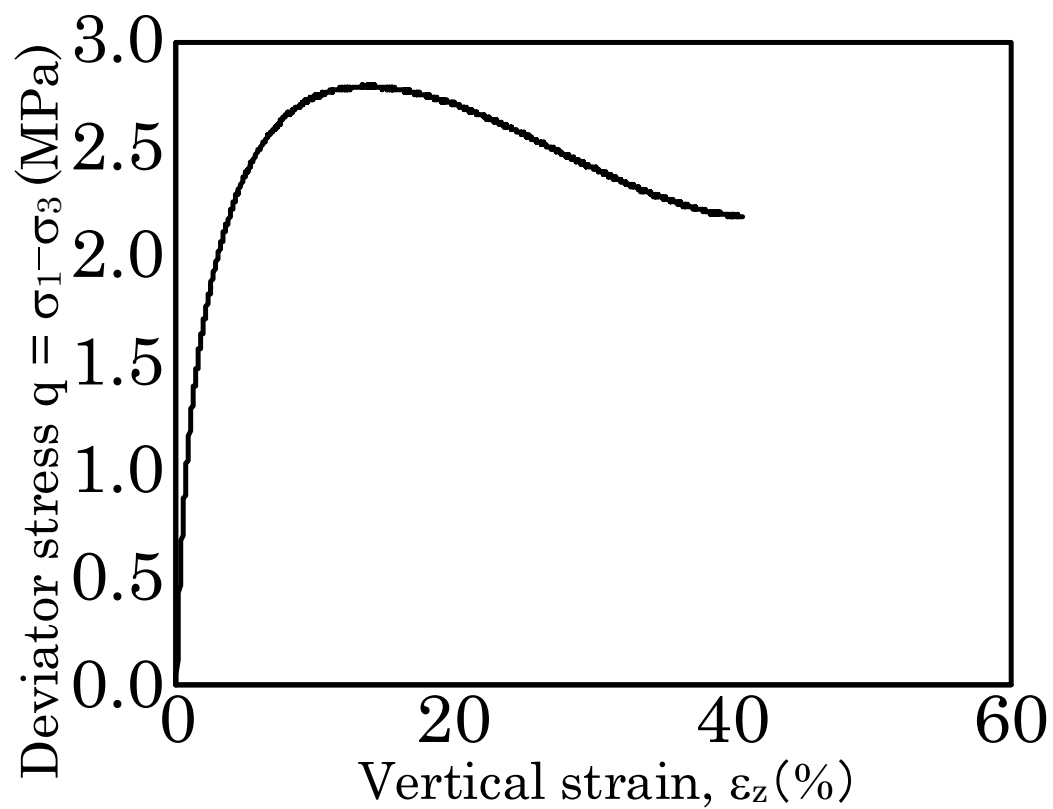


図 3. 3. 33 Hgifu005 応力ひずみ曲線

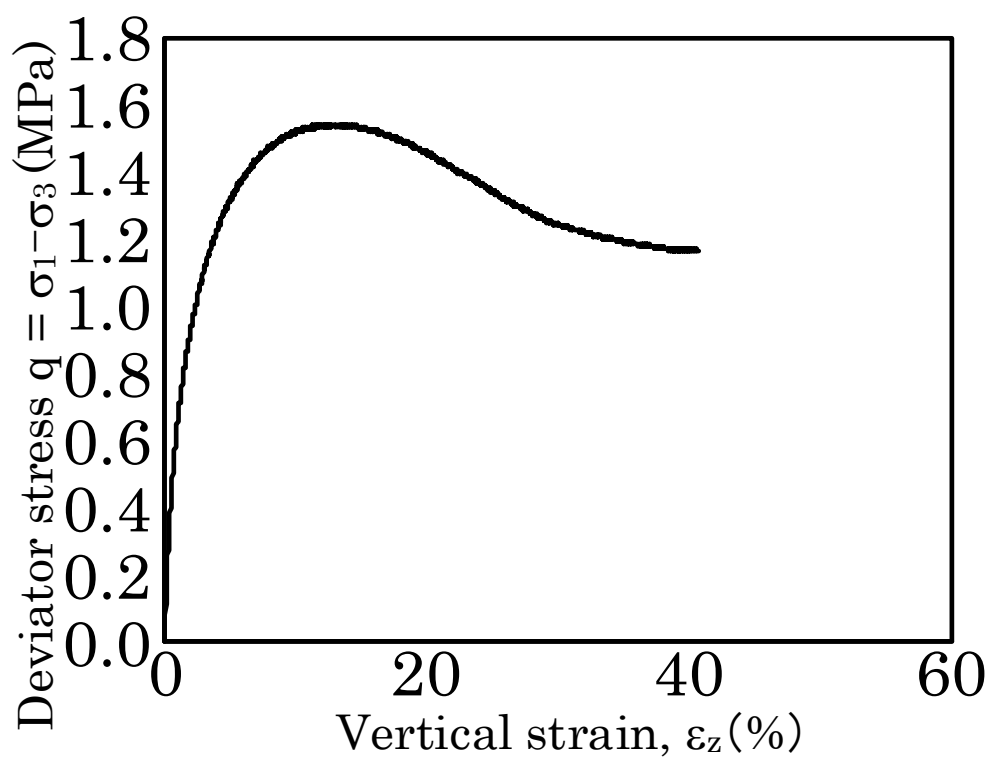


図 3. 3. 34 Hgifu006 応力ひずみ曲線

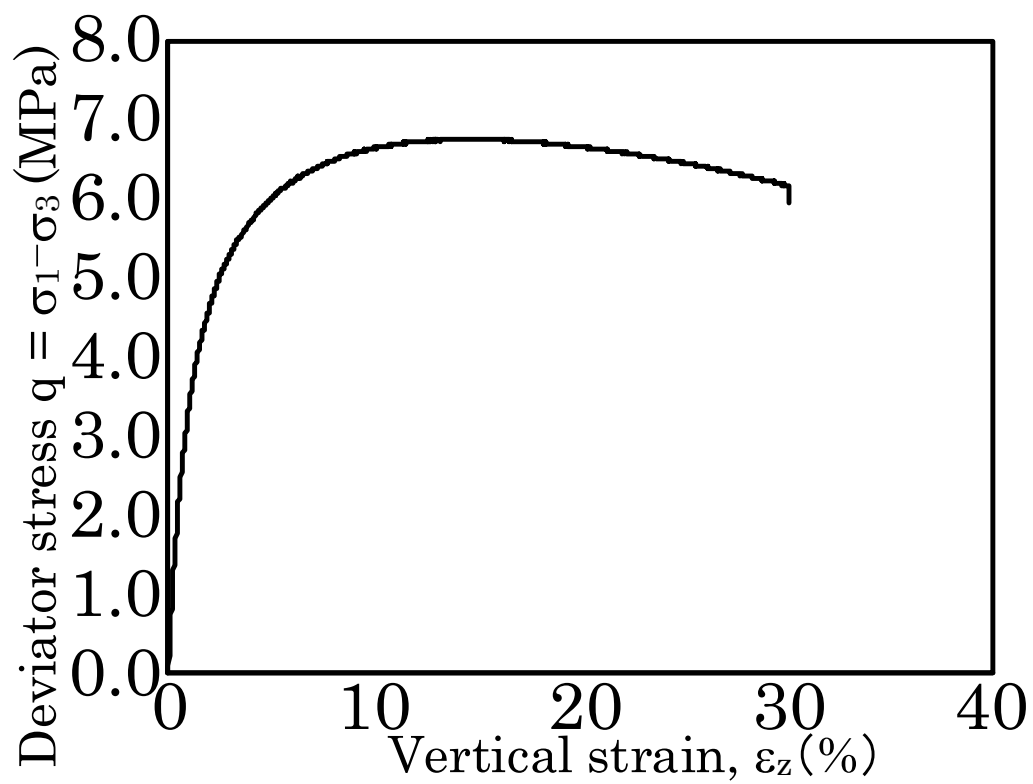


図 3. 3. 35 DHTC002 応力ひずみ曲線

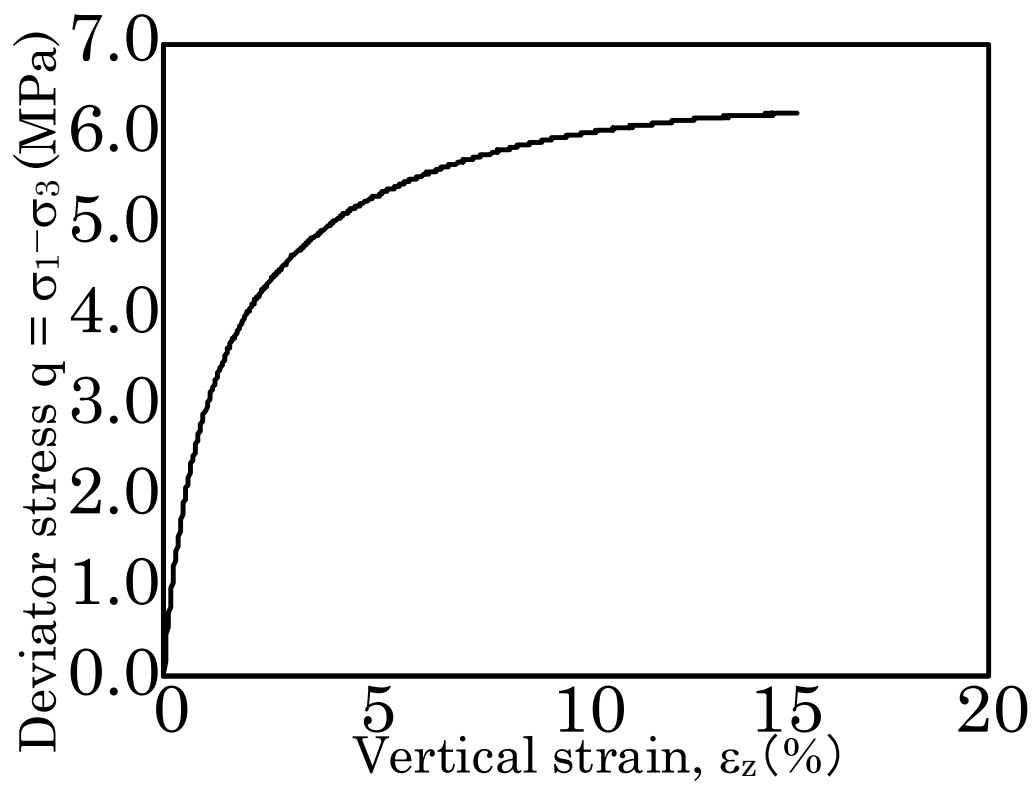


図 3. 3. 36 DHTC003 応力ひずみ曲線

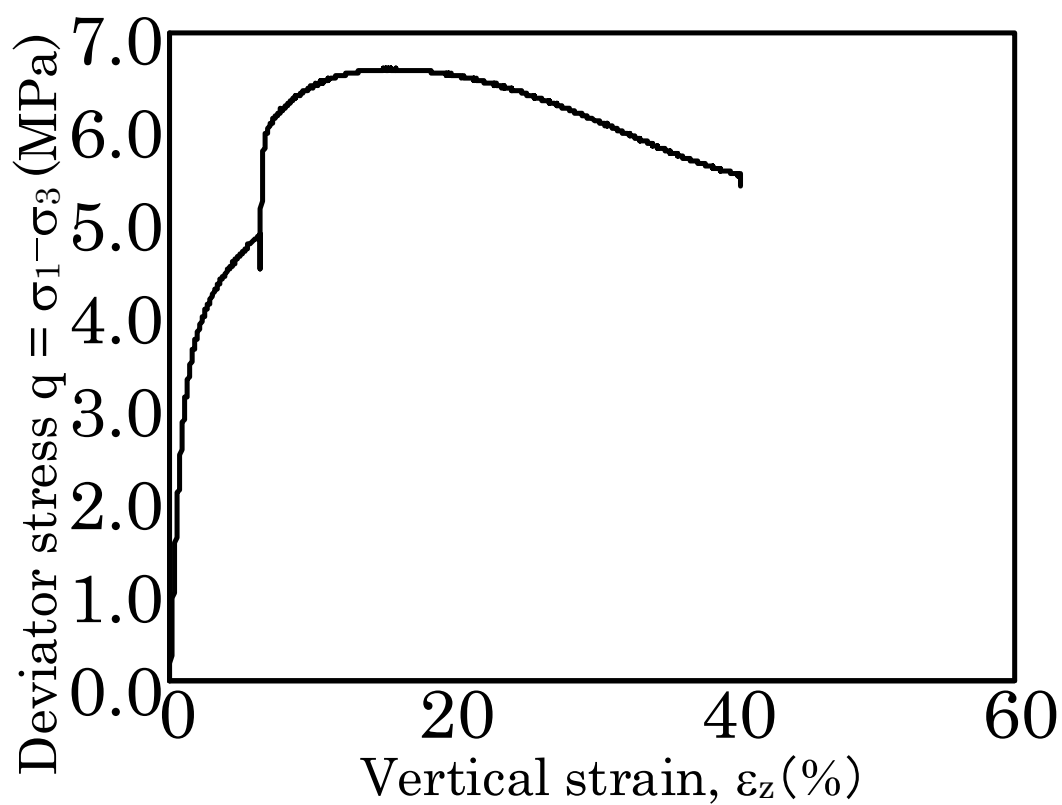


図 3. 3. 37 DHTC004 応力ひずみ曲線

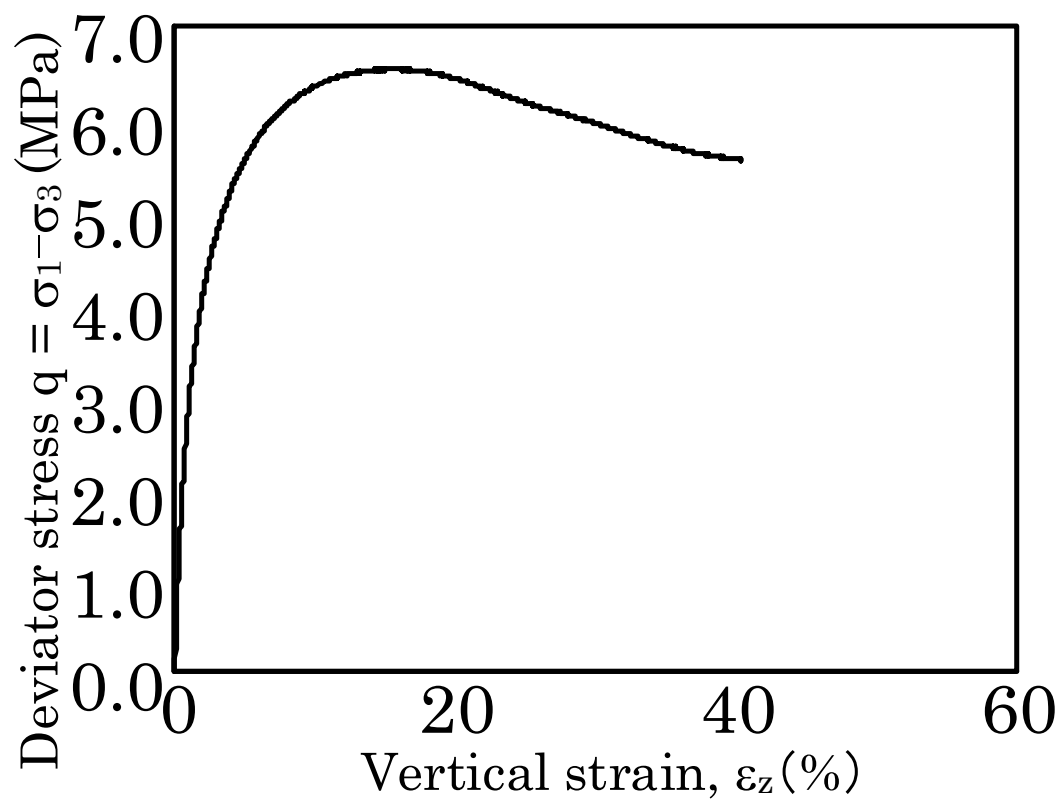


図 3. 3. 38 DHTC005 応力ひずみ曲線

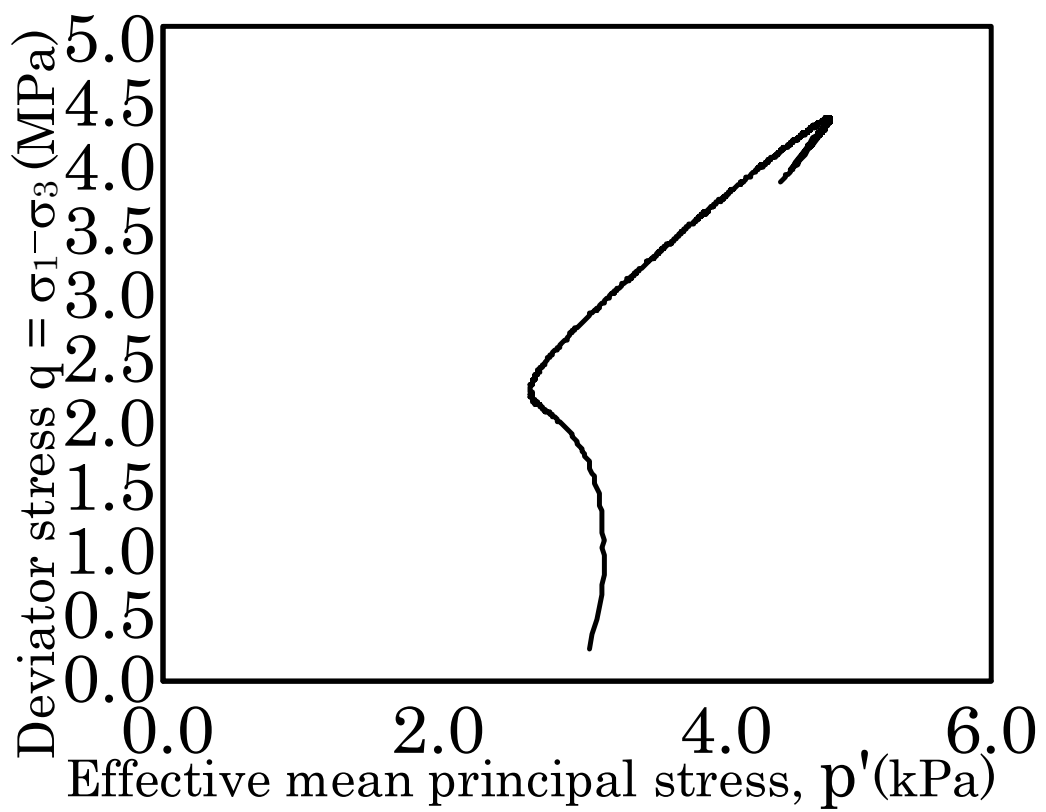
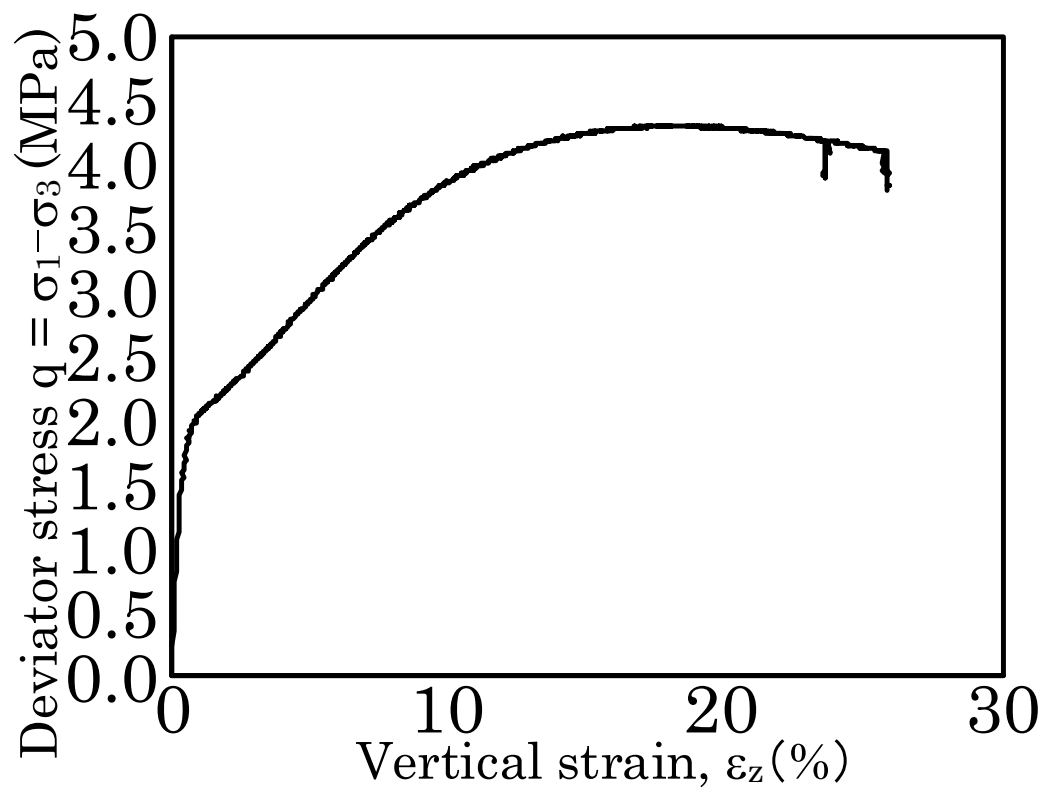


図 3. 3. 39 UHTC002 応力ひずみ曲線・応力経路図

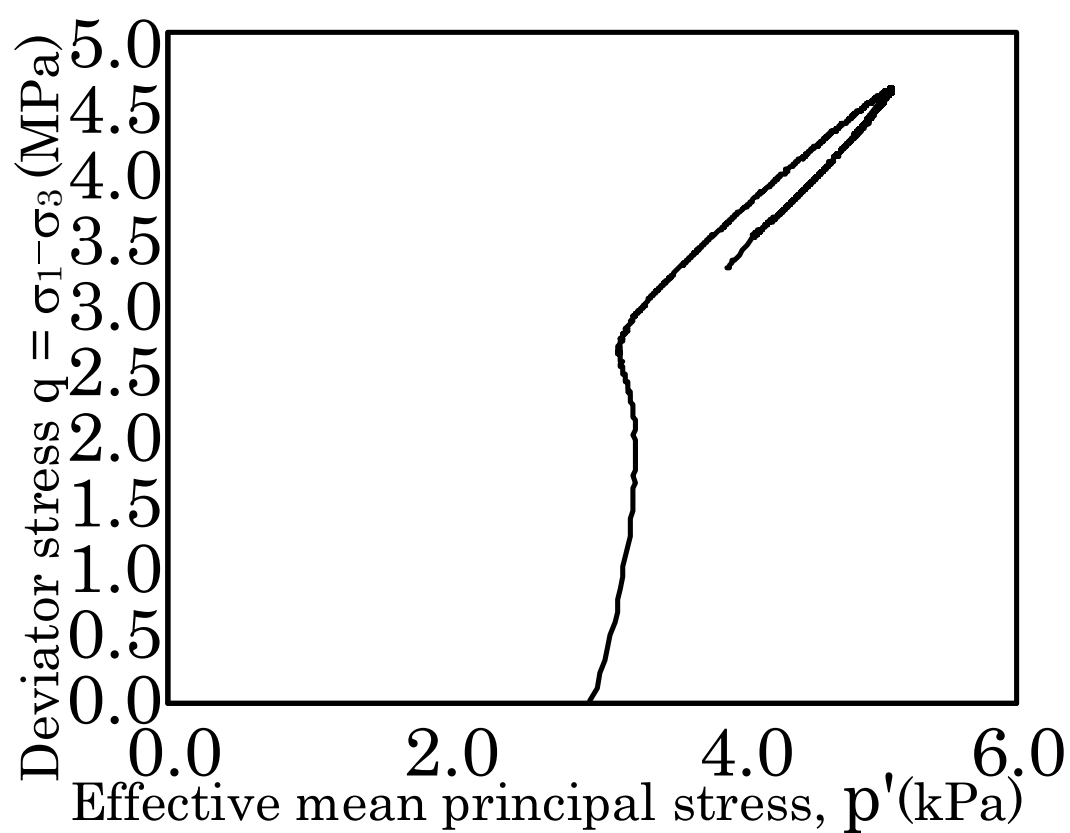
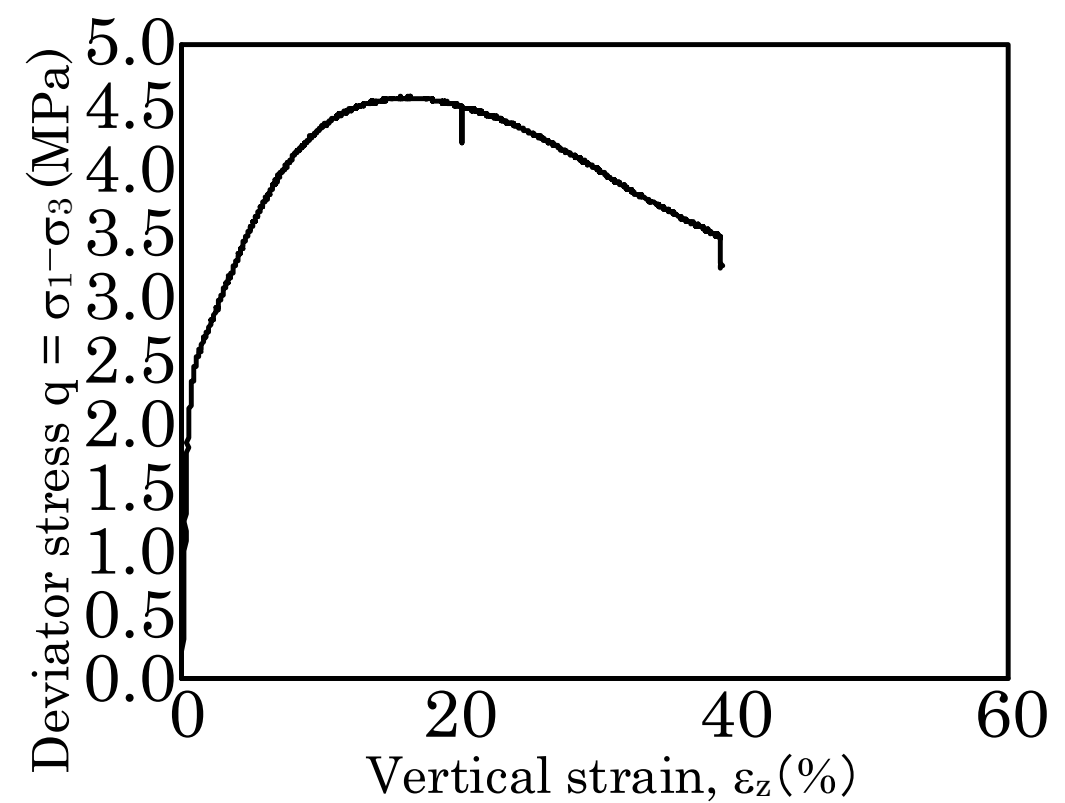


図 3. 3. 40 UHTC003 応力ひずみ曲線・応力経路図

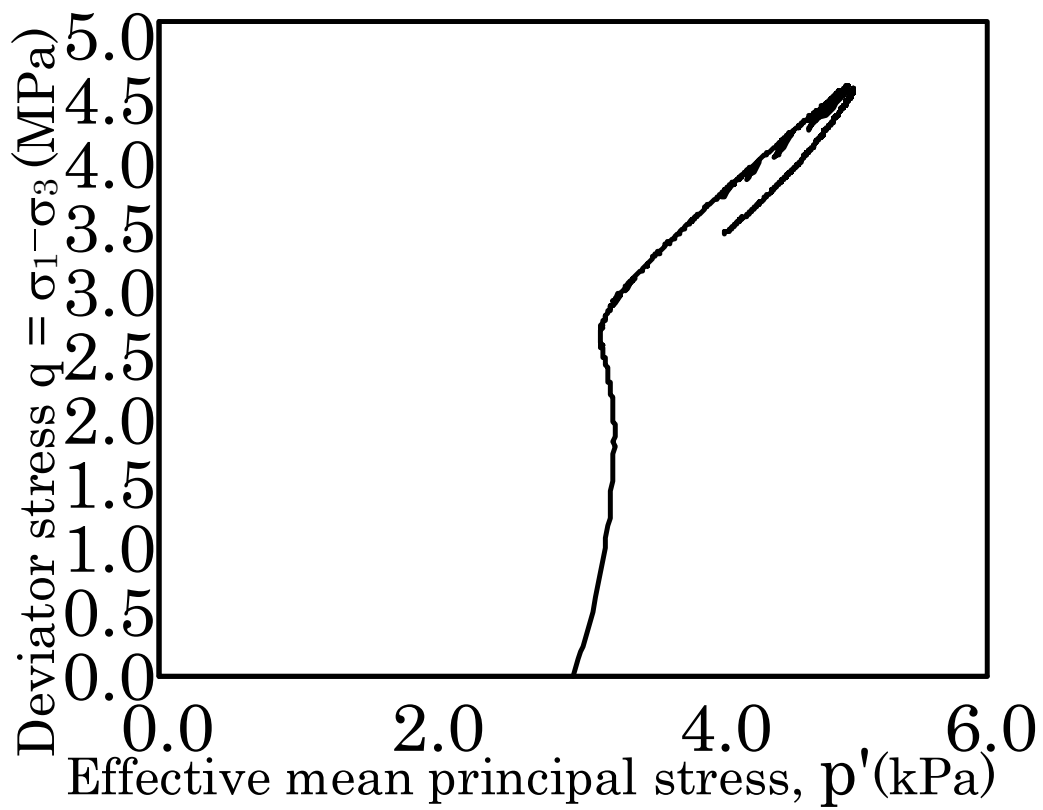
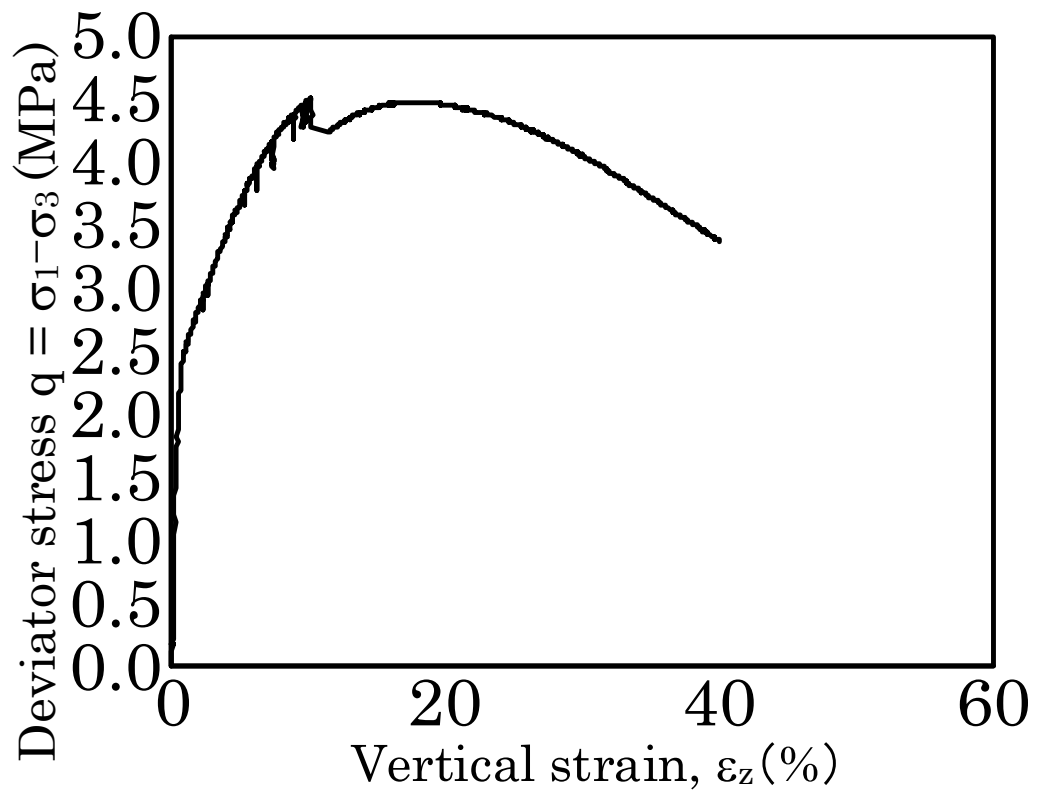


図 3. 3. 41 UHTC004 応力ひずみ曲線・応力経路図

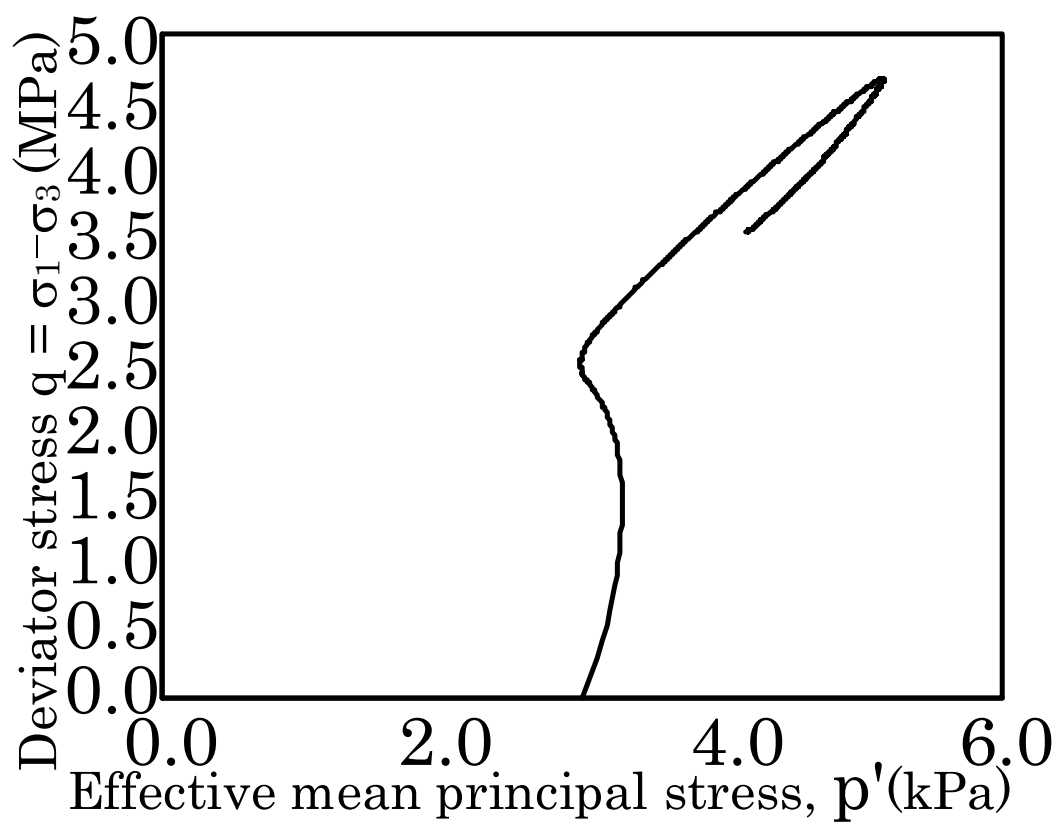
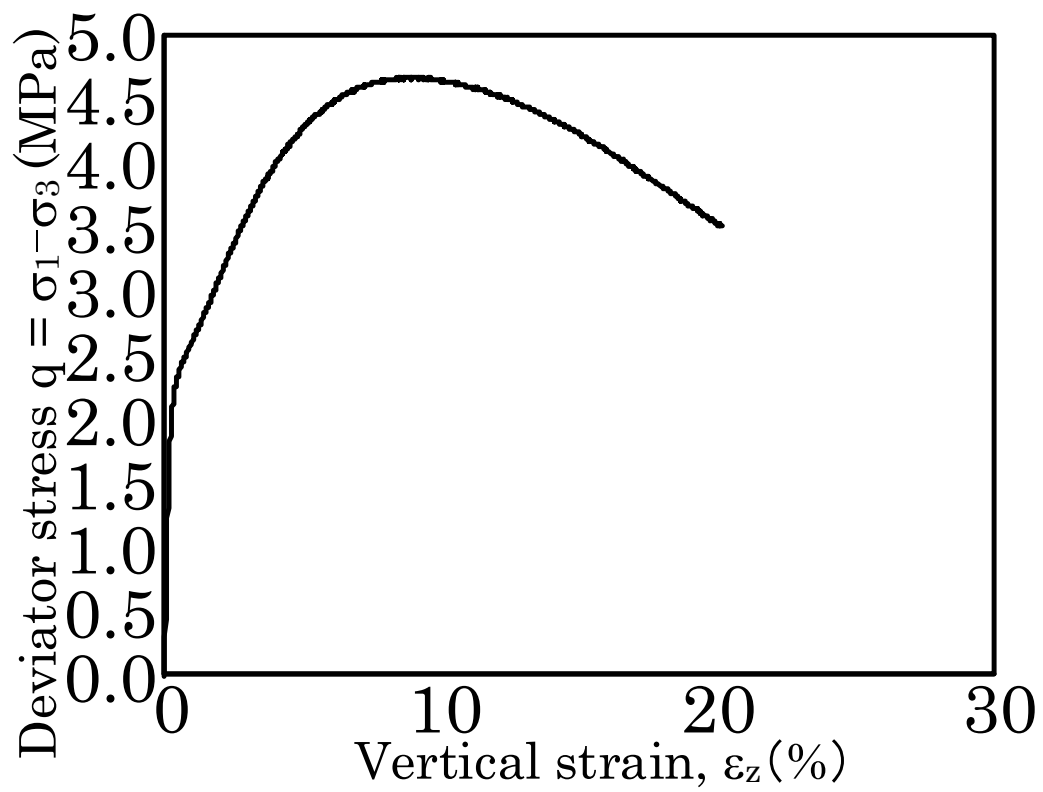


図 3. 3. 42 UHTC005 応力ひずみ曲線・応力経路図

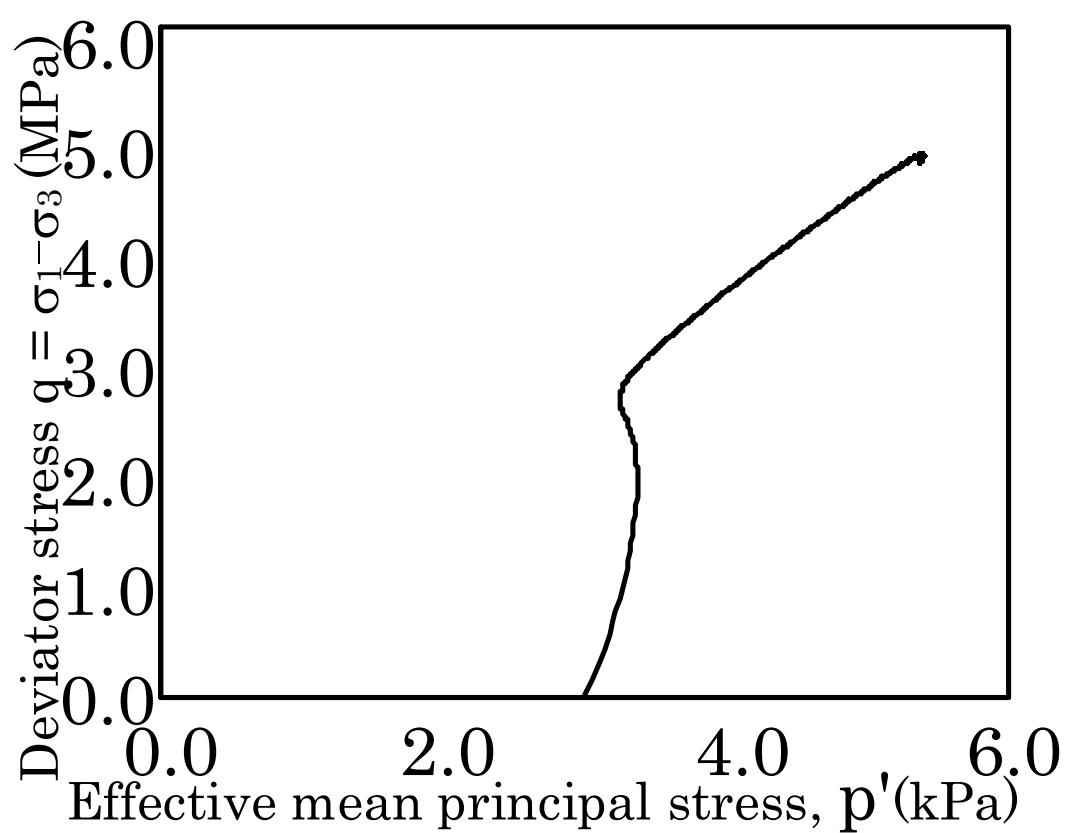
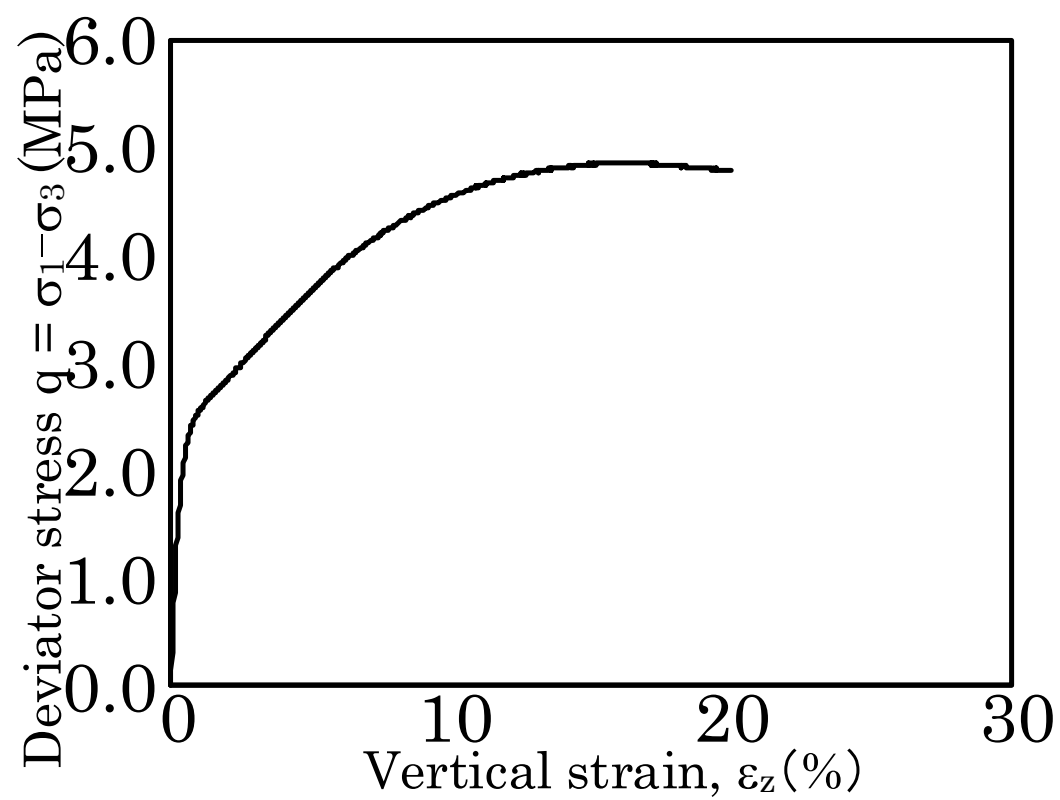


図 3. 3. 43 UHTC006 応力ひずみ曲線・応力経路図

第 4 章

砂の破碎性 モデル

はじめに

砂の破碎性を評価する指標はこれまで様々提案されており、細粒分と一口に言っても様々な定義が存在する。今回は 1.3 にて説明した骨格間隙比を用いるため細粒分含有率 FC (75 μ 質量通過率) を採用した。骨格間隙比では、細粒分含有率 FC を 75 μ 質量通過率と定義することによって間隙比を再定義しているため、本研究では細粒分を 75 μ 質量通過率として実験結果を整理した。

細粒分含有率 FC を砂の破碎性を評価するパラメータとして使用している研究はこれまでも行われてきた (黄, 2015)。本研究では、砂はあらかじめふるい分けを行い実験前の細粒分はすべて取り除いた状態で試験を行いせん断中の粒子破碎によってのみ細粒分が発生するものとしている。そこで、せん断中の細粒分含有率 FC とその他の力学的パラメータとの相関について調べる必要がある。今回は力学試験において主に用いられることの多い鉛直方向のひずみ ε_z 、せん断中の拘束圧 p' など様々なパラメータとの相関に加え、試験結果の考察から鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事 (鉛直ひずみ ε_z と鉛直応力 σ'_z の積) との相関について以下に記す。

また、本研究では単調載荷試験での粒子破碎による細粒分の増加をおもに扱っているが、繰り返し試験での粒子破碎現象の影響についても非常に重要な問題であると考えている、こちらについて試験結果から様々なパラメータを交え考察を行った結果、繰り返しの載荷過程、除荷過程において一つの相関で簡略に表すことが困難であるという結論に至った。他の破碎性パラメータの使用や、パラメータを増やし関係式を複雑にすれば或いは関係性を調べることは可能であると予想されるが、本研究では単調載荷試験に絞って議論したい。

4.1 砂の破碎性とひずみの関係

図 4.1 は過去および今回行った豊浦砂を用いた低圧から高圧までの排水三軸圧縮試験の結果せん断後に測定した細粒分含有率 FC と鉛直方向ひずみ ε_z の相関である。様々な拘束圧とひずみ量で試験を行った結果このグラフから、細粒分含有率 FC と鉛直方向ひずみ ε_z の間には線形関係が成り立つことが分かった。

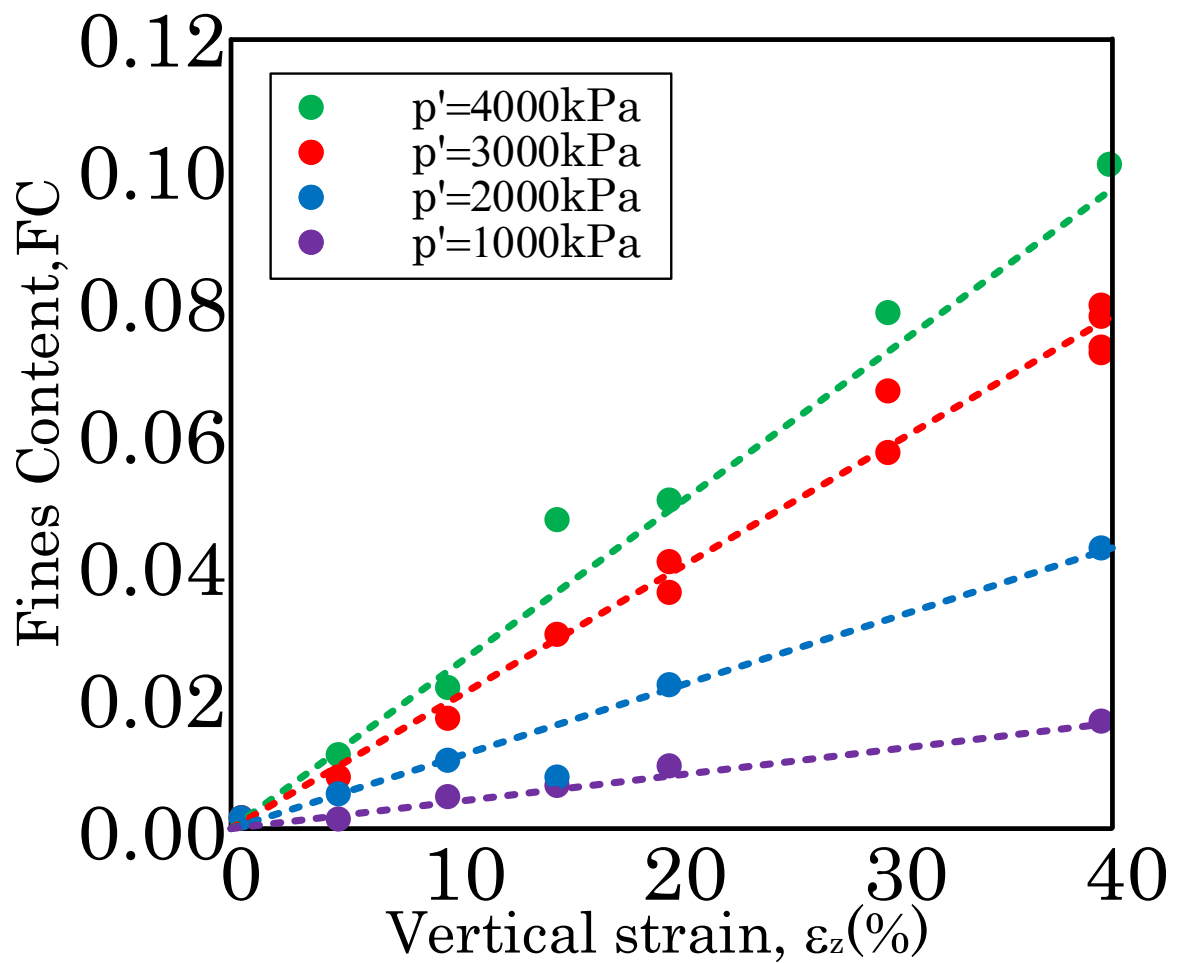


図 4.1 豊浦砂の細粒分含有率とひずみの相関

4.2 砂の破碎性と拘束圧の関係

図 4.2 は過去および今回行った豊浦砂を用いた低圧から高圧までの排水三軸圧縮試験の結果せん断後に測定した細粒分含有率 FC とせん断中の拘束圧 p' の相関である。 $\epsilon_z=40\%$ で行った試験結果を使用したこのグラフをみると、 $p' = 1000$ kPa 以下の低圧部では細粒分の増加は小さく 1000 kPa 以上の高圧部において粒子破碎がより顕著に起きていることが示された。

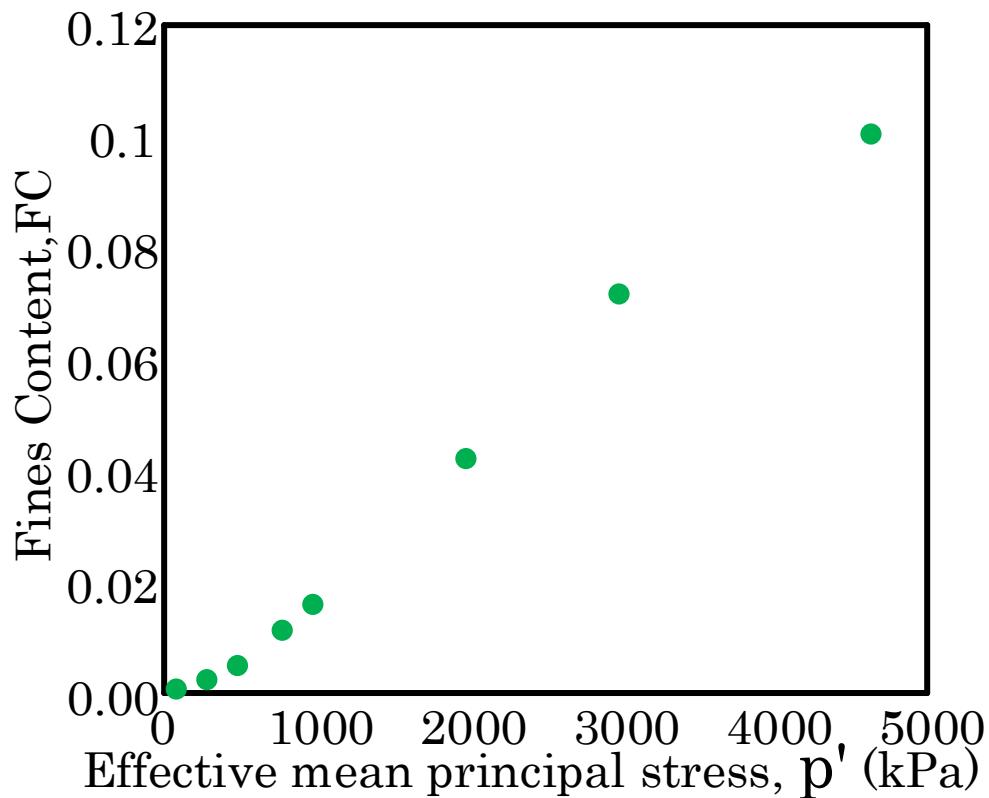


図 4.2 豊浦砂の細粒分含有率と拘束圧の相関

4.3 砂の破碎性とせん断仕事の関係

FC とひずみのみの相関はとてもシンプルかつ簡略なものであったが、せん断中に拘束圧の変化しない排水試験において破碎性を評価するには有効であるが、せん断中に拘束圧の変化する非排水せん断試験では使用することができない、そこで拘束圧の影響を相関に含ませることで非排水試験においても使用することのできる相関関係を調べた。

図 4.3.1 は過去および今回行った豊浦砂を用いた低圧から高圧までの排水三軸圧縮試験の結果せん断後に測定した細粒分含有率 FC と鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事（鉛直ひずみ ϵ_z と鉛直応力 σ'_z の積）との相関である。拘束圧やひずみ量を様々組み合わせて試験を行った結果を用いたこのグラフから、細粒分含有率 FC と鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事（鉛直ひずみ ϵ_z と鉛直応力 σ'_z の積）の間には線形関係が成り立つものとし、その傾きを B_w として破碎性を表す砂固有のパラメータとして新たに定義した。（豊浦砂の場合は $B_w=0.002\%$ ）

低圧部について、注目してみるとひずみの小さいものは線形関係を保っている

が、40%ひずみの大変形の試験結果は線形的な挙動を示していない、これは4.2でも述べた拘束圧との相関関係が非線形なものになっていることが理由と考えられる。しかし、粒子破碎の特徴を考えるうえで低圧部よりも、高圧部での現象の影響の方が支配的であると大局的に判断し、この関係を線形関係とみて考察を行うものとした。

図4.3.2は過去および今回行った豊浦砂を用いた低圧から高圧までの排水三軸圧縮試験結果と今回行った非排水三軸圧縮試験の結果を比較したグラフである。排水条件と非排水条件のいずれにおいても上記の相関は成り立つことが示された。

図4.3.3は今回行った豊浦砂、飯豊砂、岐阜砂を用いた低圧から高圧までの排水三軸圧縮試験の結果せん断後に測定した細粒分含有率FCと鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事（鉛直ひずみ ε_z と鉛直応力 σ'_z の積）との相関である。このグラフから他の砂を用いても上記の相関は成り立つことが示された。

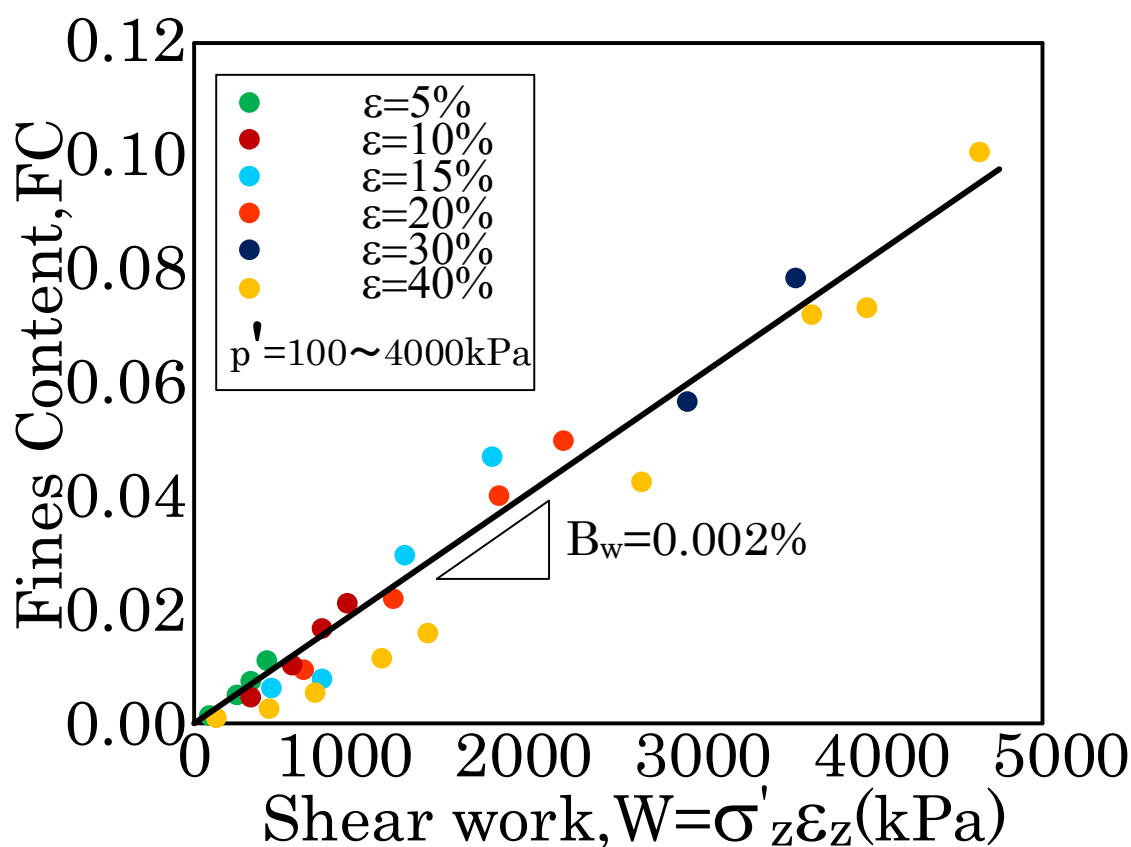


図4.3.1 豊浦砂の細粒分含有率とせん断仕事の相関

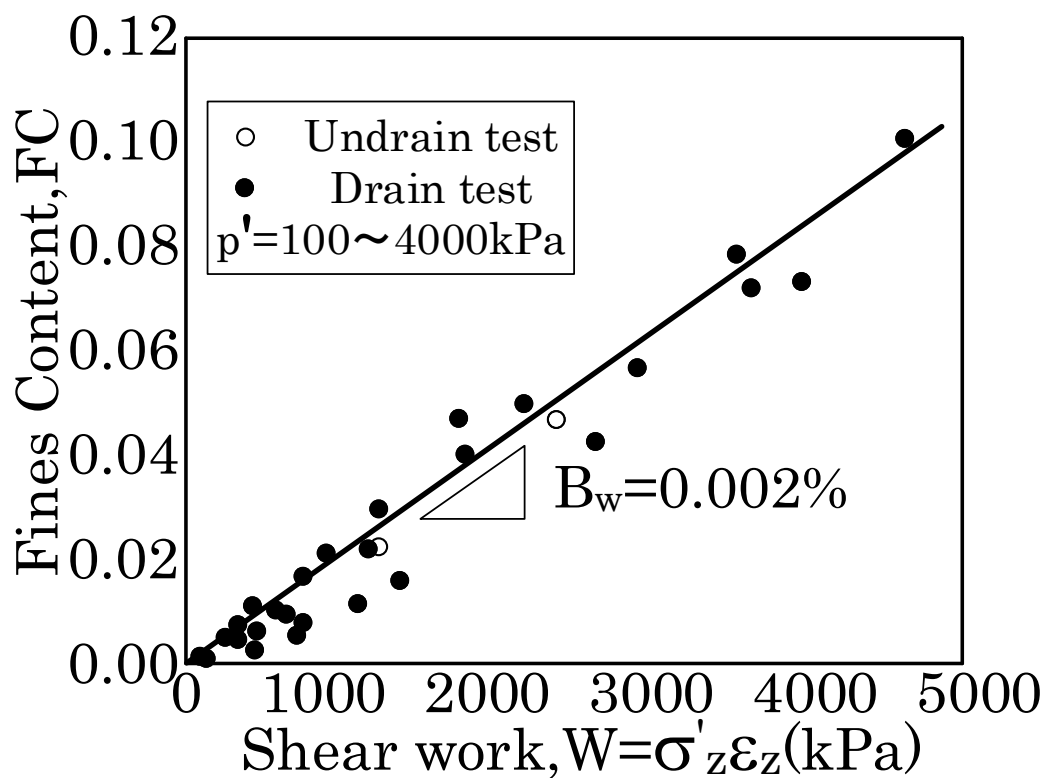


図 4.3.2 排水条件と非排水条件での細粒分含有率とせん断仕事の相関

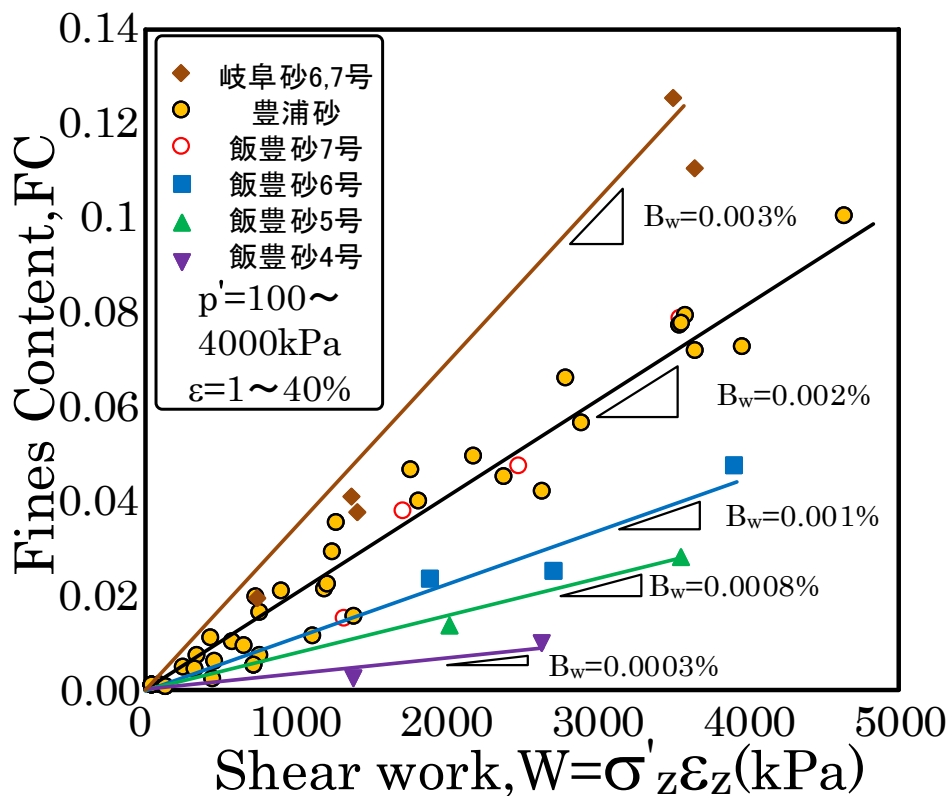


図 4.3.3 豊浦砂、飯豊砂、岐阜砂の細粒分含有率とせん断仕事の相関

4.3.1 粒径の異なる砂の破碎性

今回の試験では粒径の異なる砂の破碎性を調べる目的で飯豊砂を使用した排水試験を行った。図 4.3.1.1 および表 4.3.1.1 は飯豊砂を用いた試験結果の飯豊砂の細粒分含有率とせん断仕事のグラフと 4～7 号飯豊砂の B_w の値である。

この結果から、粒径が大きくなると破碎性が小さくなっていることがわかる。ここで、図 4.3.1.2 および図 4.3.1.3 はせん断前とせん断後の 4～7 号飯豊砂の粒径加積曲線である。このグラフからそれぞれの砂において粒径が大きくなっても破碎自体は起こっていることがわかる。このことから、粒径が大きくなると破碎性が小さくなるのではなく、実際にどの粒径でも破碎は生じているが今回細粒分と定義した 75μ 以下の粒子の発生量は粒径が大きくなるにつれて小さくなっているということが実態であると考えられる。則ち粒子破碎による細粒分の増加量に与える粒径の影響に関して FC のみを用いた評価方法では評価できない部分があることが分かった。

表 4.3.1.1 4～7 号飯豊砂の B_w

	7号	6号	5号	4号
$B_w(\%)$	0.002	0.001	0.0008	0.0003

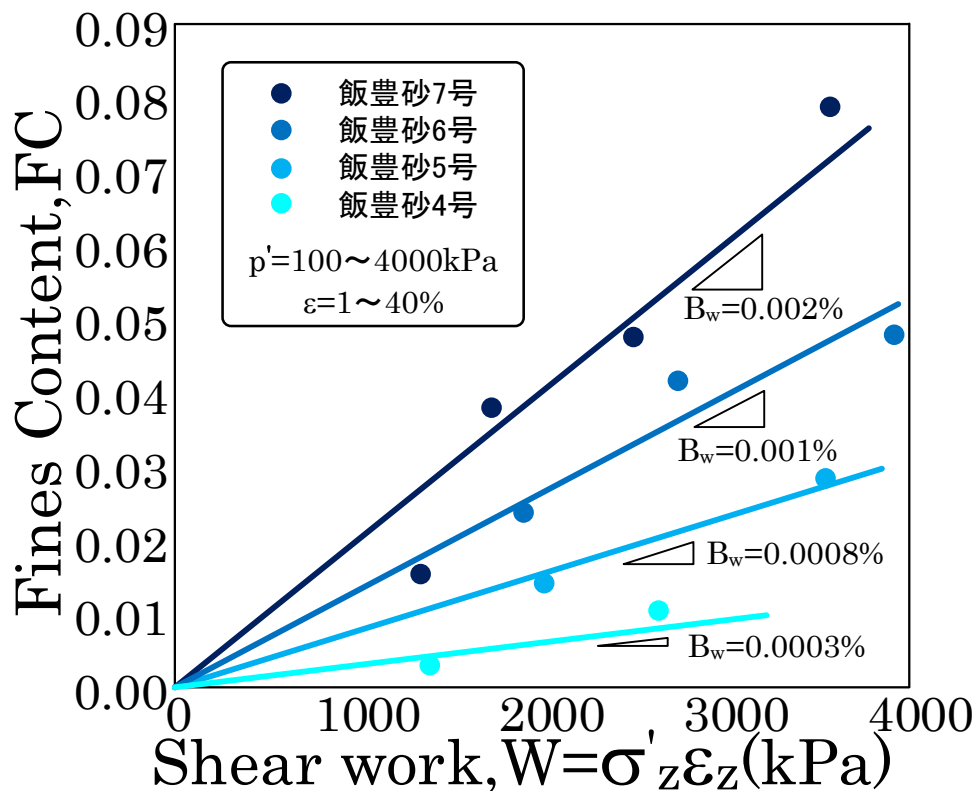


図 4.3.1.1 飯豊砂の細粒分含有率とせん断仕事の相関

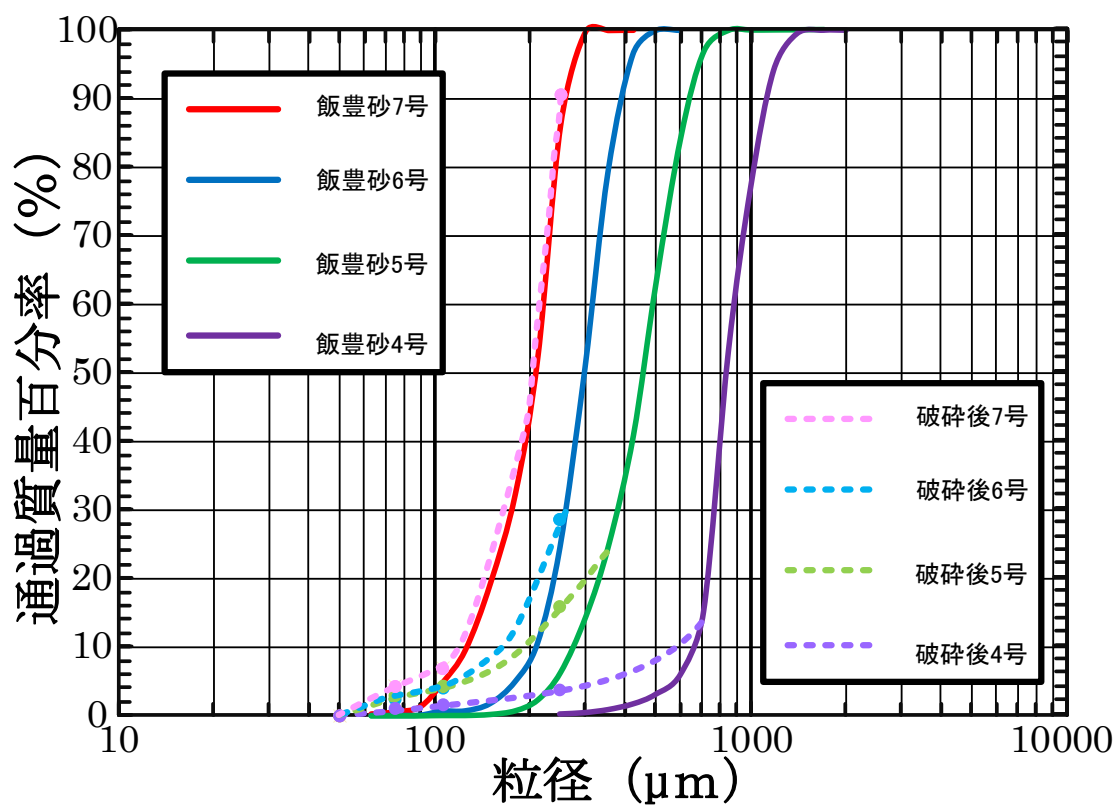


図 4. 3. 1. 2 破碎前後の飯豊砂の粒径加積曲線 1

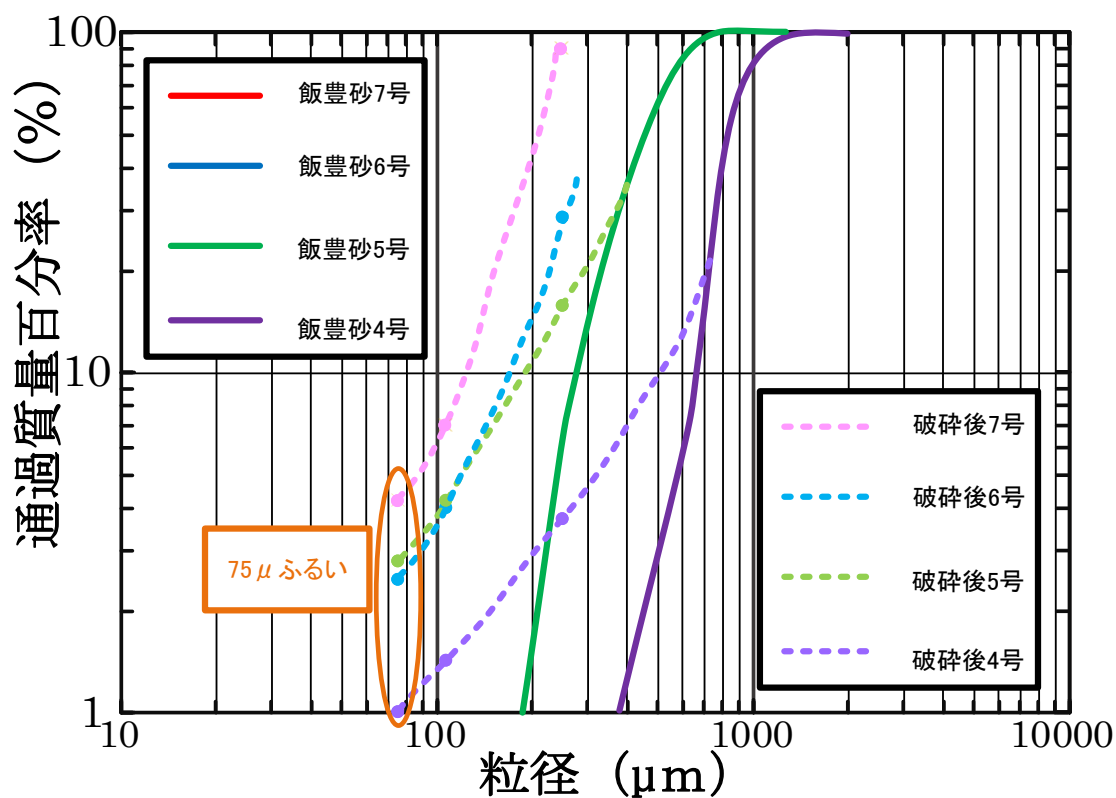


図 4. 3. 1. 3 破碎前後の飯豊砂の粒径加積曲線 2

4.3.2 粒子形状の異なる砂の破碎性

図 4.3.1.2 は岐阜砂を用いた試験結果の飯豊砂の細粒分含有率とせん断仕事のグラフである。岐阜砂の 6.7 号は豊浦砂と粒径が近く、粒子形状が豊浦砂よりも角張った形をしている。(第 2 章参照)

粒子形状の異なる砂を比較した結果、グラフから岐阜砂は $B_w=0.003\%$ となり、粒子形状がより丸い豊浦砂 ($B_w=0.002\%$) との比較から粒子形状が角張っている方が破碎性は大きいということが示された。この結果は粒子の角や表面が小さく欠けて破片が細粒分となる粒子破碎の特徴とも一致する。

今回の結果では破碎性は約 1.5 倍と違いはあるがそれほど大きな違いは観察できなかった、試験に適した材料を探すのが困難であるため、より適した材料を使用すればさらに顕著な違いが期待できる。

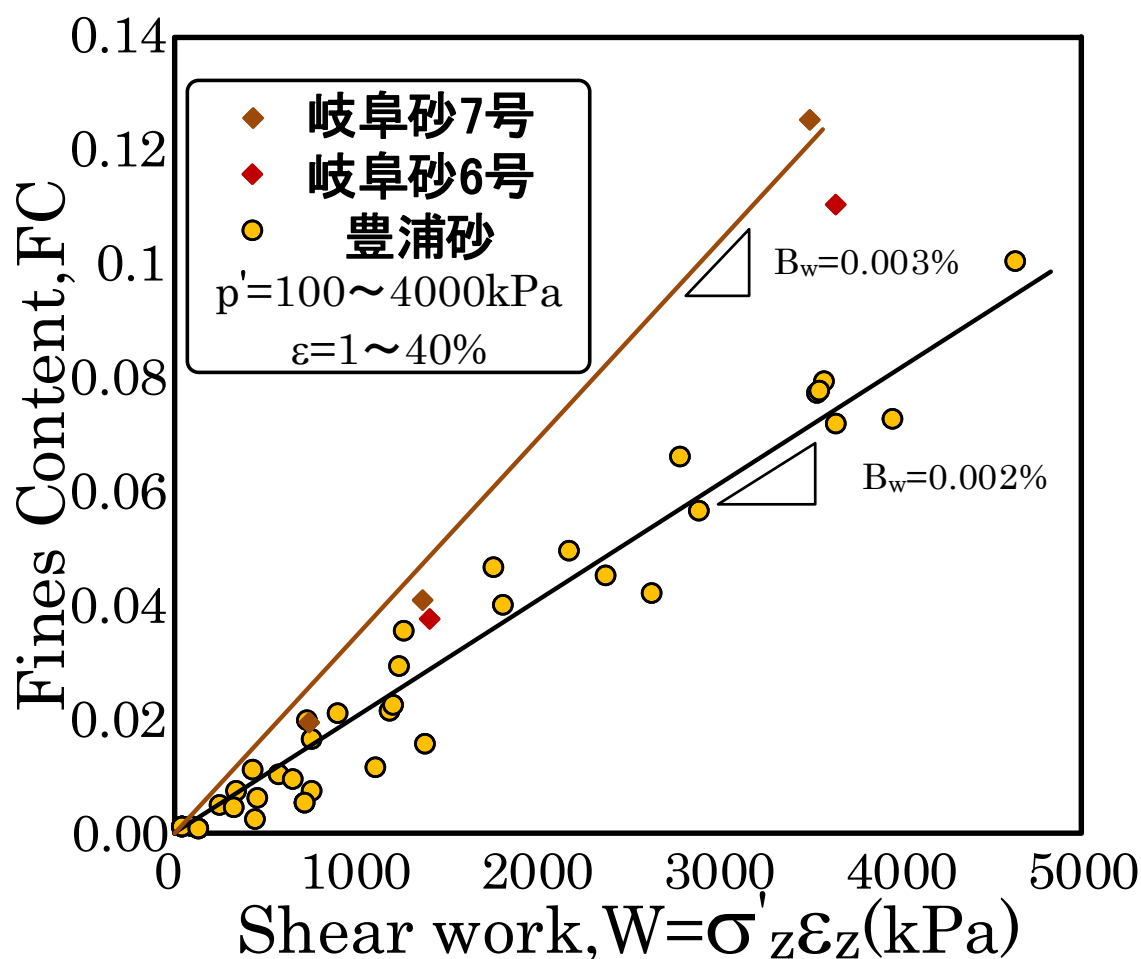


図 4.3.2.1 粒子形状の異なる岐阜砂と豊浦砂の破碎性の比較

第 5 章

粒子破碎の無い定常状態線

はじめに

砂の粒度分布は砂の種類によって多種多様ではあるが、このうち砂の強度を発するのは中～粗粒の粒子がほとんどであり細粒分はその隙間に漂うばかりでせん断抵抗にはほとんど寄与しないと考えられる。この考え方を基に砂中の細粒分を空隙として扱うように間隙比を補正したものが骨格間隙比 $e_s = (e + FC) / (1 - FC)$ であり、計測された間隙比 e とその砂中に含まれている細粒分 FC がわかれば骨格間隙比を計算することが可能である。

ここで、初期状態で $FC = 0$ の豊浦砂を非排水条件でのせん断するとき、せん断中に全く粒子破碎しないとすれば常に $FC = 0$ である。すなわち、定常状態も含めて常に $e_s = e$ となるので、前述した骨格間隙比 e_s を用いた定常状態線は豊浦砂が全く粒子破碎しなかった場合の定常状態線であると言える。

本章では、第4章にて定式化した細粒分 FC からせん断中の骨格間隙比の変化を計算し、せん断中の粒子破碎によって増加した細粒分が定常状態強度にどのような影響を持っているのかを調べた。

5.1 豊浦砂の定常状態線

図 5.1.1 は Verdugo (1996) によって過去に行われた豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断試験の結果とそのせん断中に発生したせん断仕事から計算した細粒分 FC を用いて計算した骨格間隙比による定常状態線である。以後、試験結果を、粒子破碎が起こった定常状態線、骨格間隙比によって計算された定常状態線を粒子破碎がない定常状態線とする。このグラフからは破碎のないものの方が全体的に上部に位置し、特に 1000kPa 以下の低圧部では間隙比 e と骨格間隙比 e_s との間に差はほとんどないように見えるが、1000kPa より拘束圧が大きくなると骨格間隙比 e_s が間隙比 e にくらべてかなり大きくなっていることが分かった。これは、せん断中の粒子破碎が高圧部で特に大きくなるためであると考えられる。

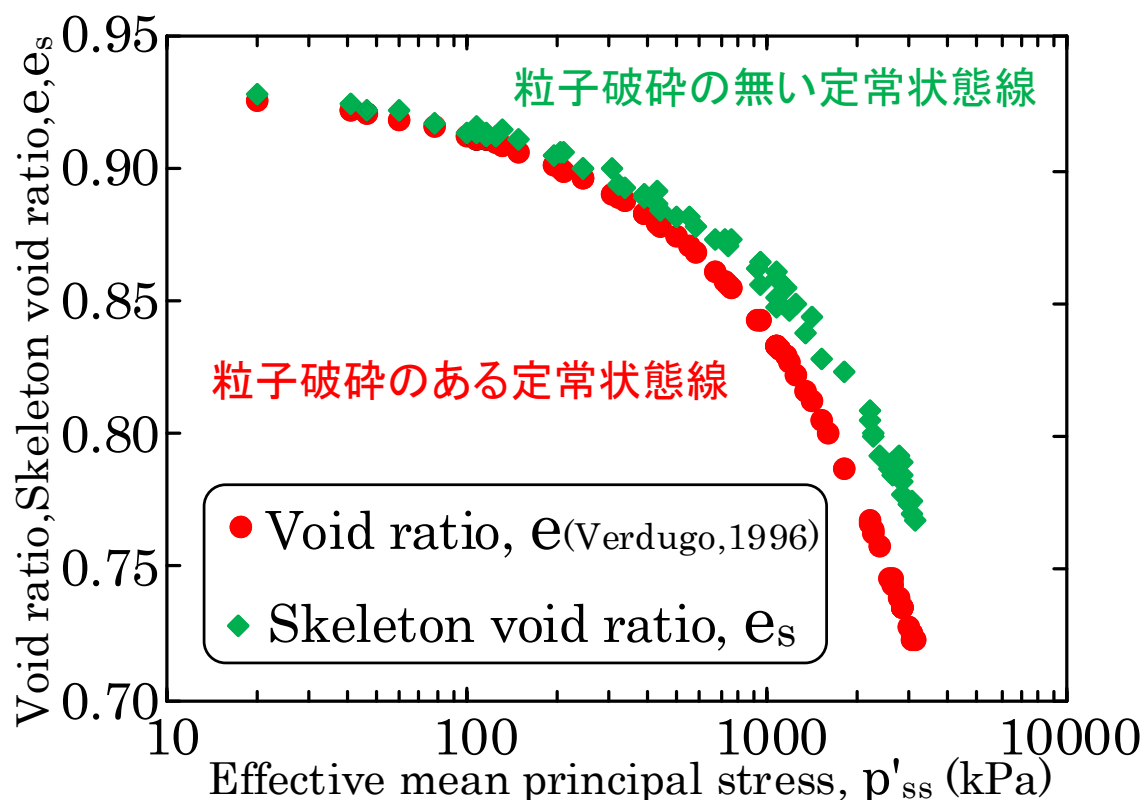


図 5. 1. 1 骨格間隙比を用いた豊浦砂の定常状態線の比較

5. 2 飯豊砂の定常状態線

図 5. 2. 1～5. 2. 4 は山田・山村 (2018) によって行われた 4～7 号飯豊砂を用いた非排水三軸圧縮せん断試験の結果から得られた定常状態線と、そのせん断中に発生したせん断仕事から計算した細粒分 FC を用いて計算した骨格間隙比による定常状態線である。

各グラフから、破碎がある定常状態線と無いものを比べると、豊浦砂と同様に破碎のないものの方が全体的に上部に位置し、特に 1000kPa 以下の低圧部では間隙比 e と骨格間隙比 e_s との間に差はほとんどないように見えるが、1000kPa より拘束圧が大きくなると骨格間隙比 e_s が間隙比 e にくらべてかなり大きくなっていることが分かった。

ここで、図 5. 2. 5 は 4～7 号の各飯豊砂の結果を同時にプロットし、比較した結果である。当初は、粒径の大きい砂の方が破碎は大きくなり、骨格間隙比を用いて整理をすると、破碎の無い定常状態線は粒径の大きさによらず一つに求めることができると予想していたが、このグラフを見ると、破碎性は予想に反して粒径の大きい砂の方が小さくなっていることが示された。

この結果も、4.3.1において述べた通り、骨格間隙比による細粒分の定義が 75μ 以下を指定していることが理由であると考えられるためこの結果のみから、粒径の違いの影響を比較することは困難であるということが分かった。

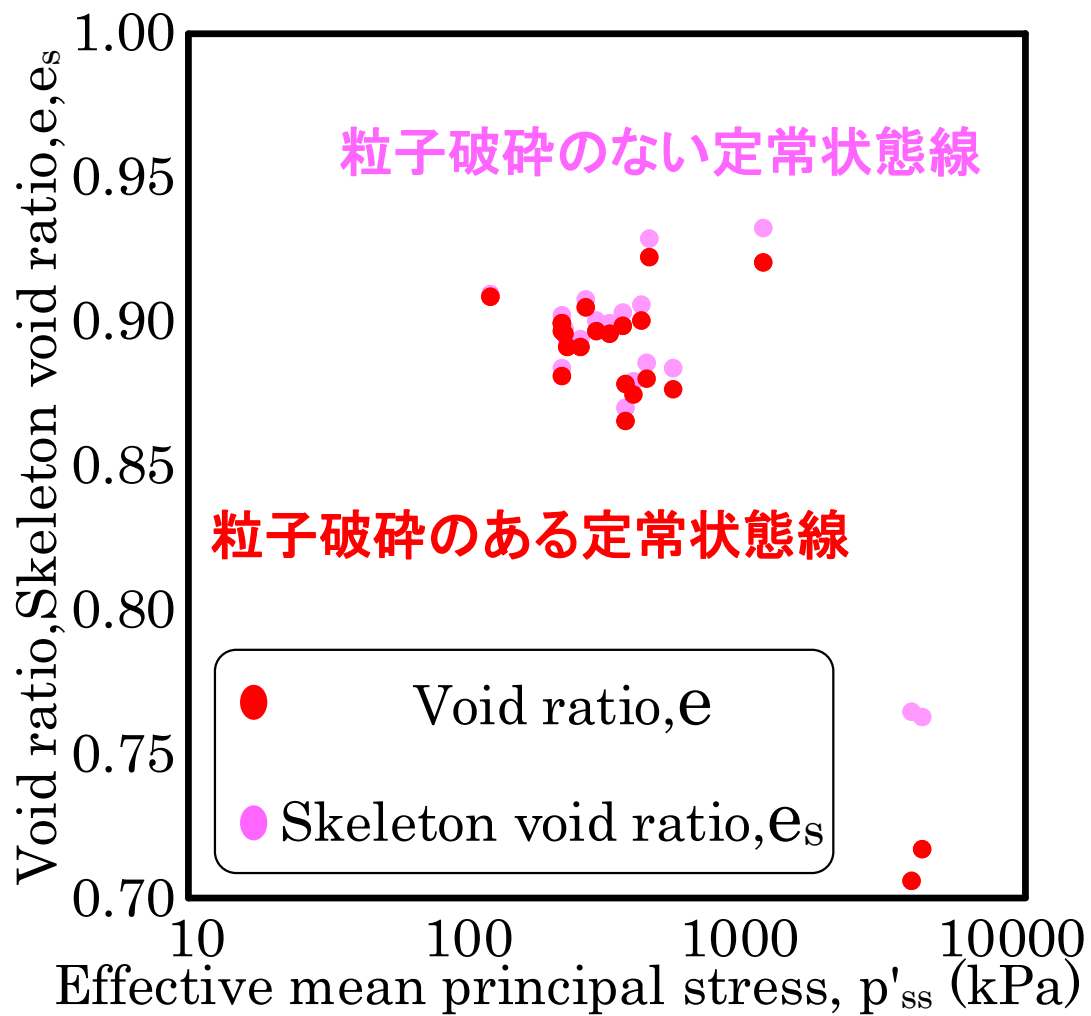


図 5.2.1 骨格間隙比を用いた 7 号飯豊砂の定常状態線の比較

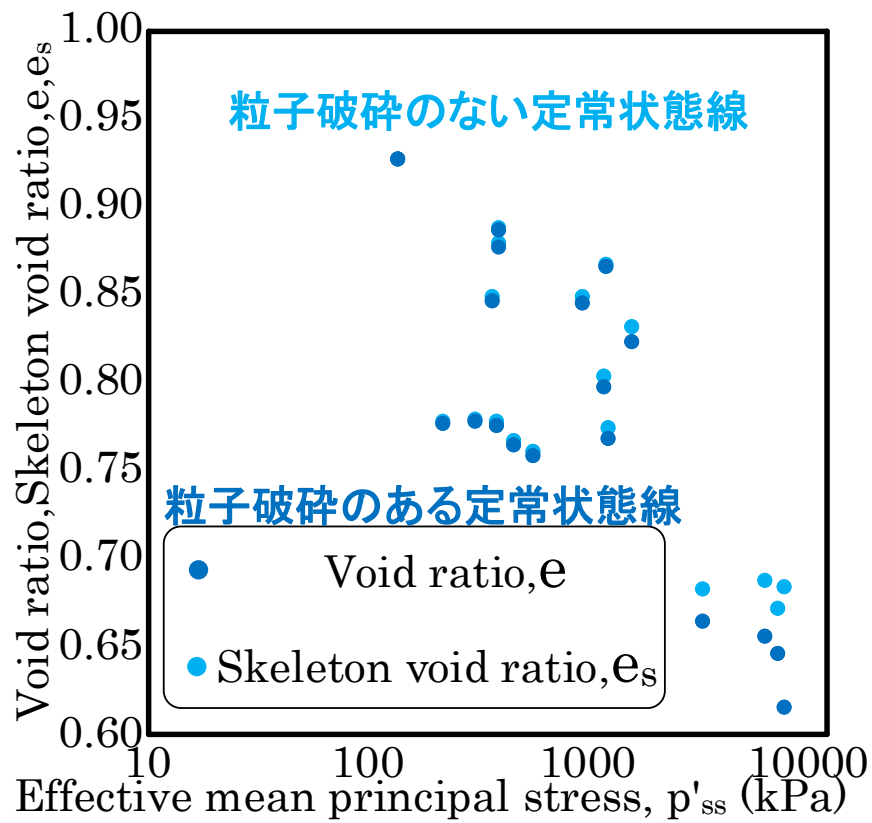


図 5. 2. 2 骨格間隙比を用いた 6 号飯豊砂の定常状態線の比較

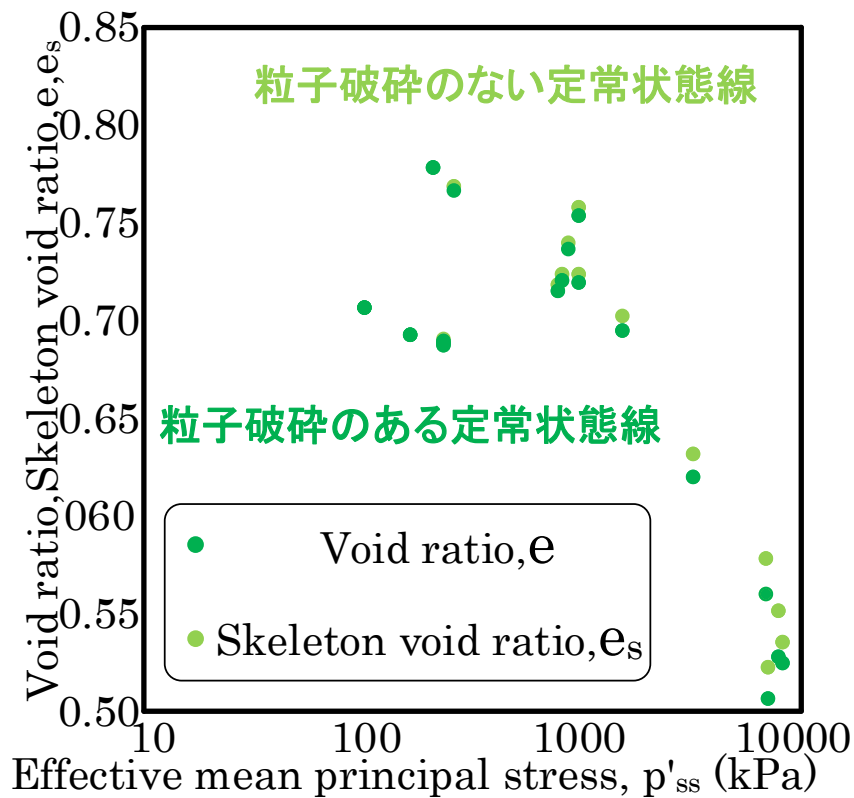


図 5. 2. 3 骨格間隙比を用いた 5 号飯豊砂の定常状態線の比較

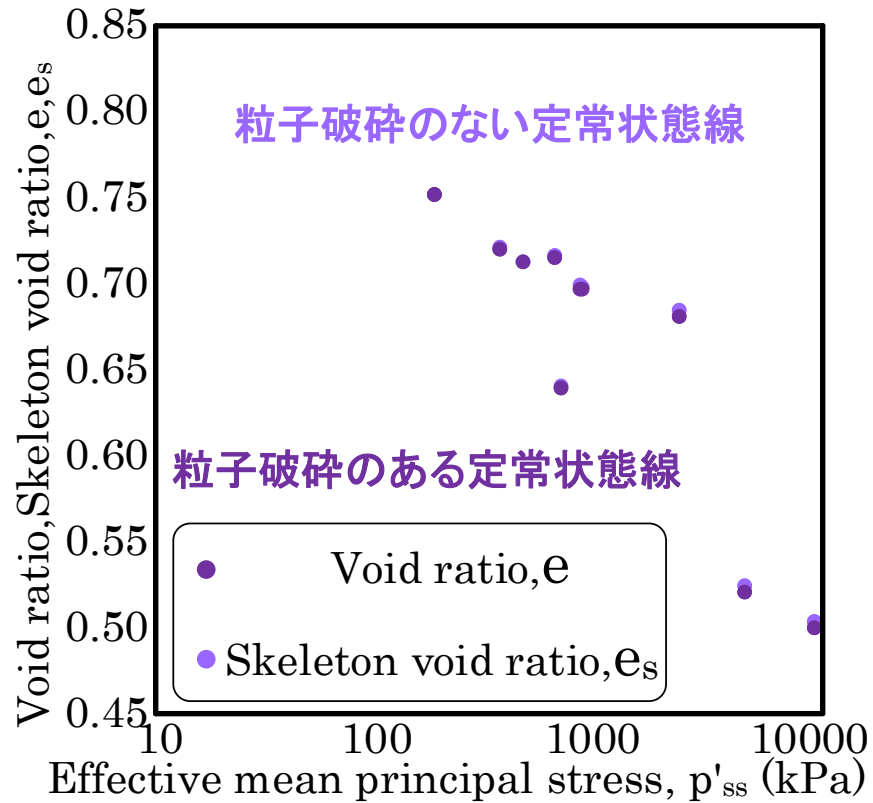


図 5. 2. 4 骨格間隙比を用いた 4 号飯豊砂の定常状態線の比較

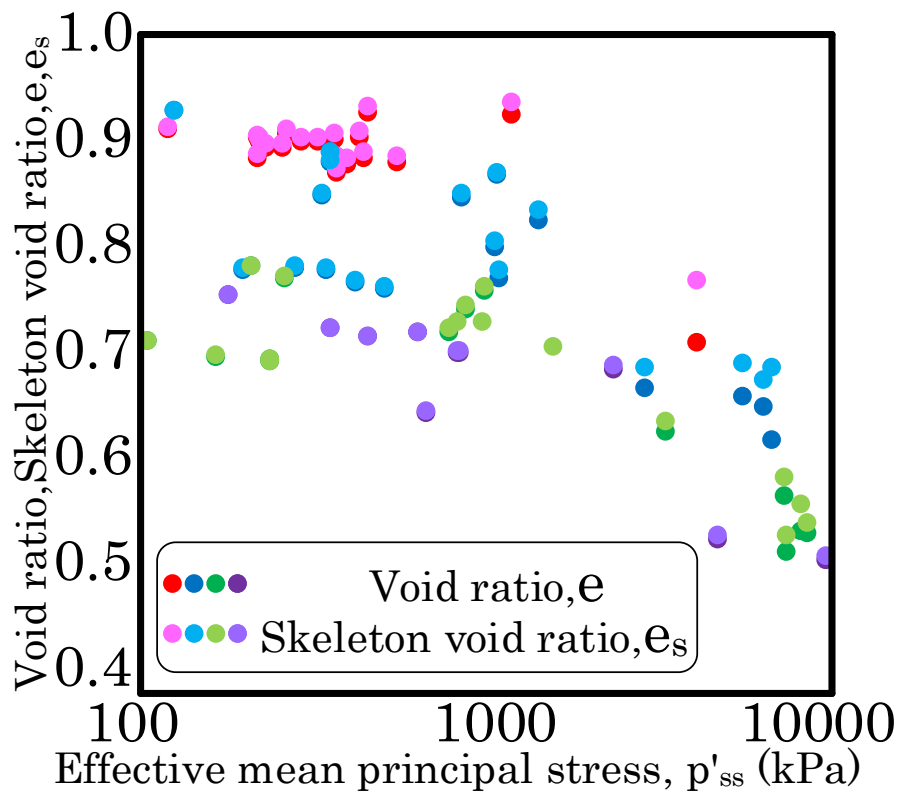


図 5.2.5 骨格間隙比を用いた 4～7 号飯豊砂の定常状態線の比較

5.3 岐阜砂の定常状態線

図 5.3.1 は同研究室の汪によって行われた 6 号飯豊砂を用いた非排水三軸圧縮せん断試験の結果から得られた定常状態線と、そのせん断中に発生したせん断仕事から計算した細粒分 FC を用いて計算した骨格間隙比による定常状態線である。

第 4 章の結果から岐阜砂は、豊浦砂よりも破碎性が大きい砂であることがわかっていいる。岐阜砂の定常状態線を豊浦砂の定常状態線と比較すると、その傾きが大きく間隙比に幅があるという違いがみられる、しかしグラフから、破碎がある定常状態線と無いものを比べると、豊浦砂と同様に破碎のないものの方が全体的に上部に位置し、特に 1000kPa 以下の低圧部では間隙比 e と骨格間隙比 e_s との間に差はほとんどないように見えるが、1000kPa より拘束圧が大きくなると骨格間隙比 e_s が間隙比 e にくらべてかなり大きくなっているという傾向は同様にみられた。

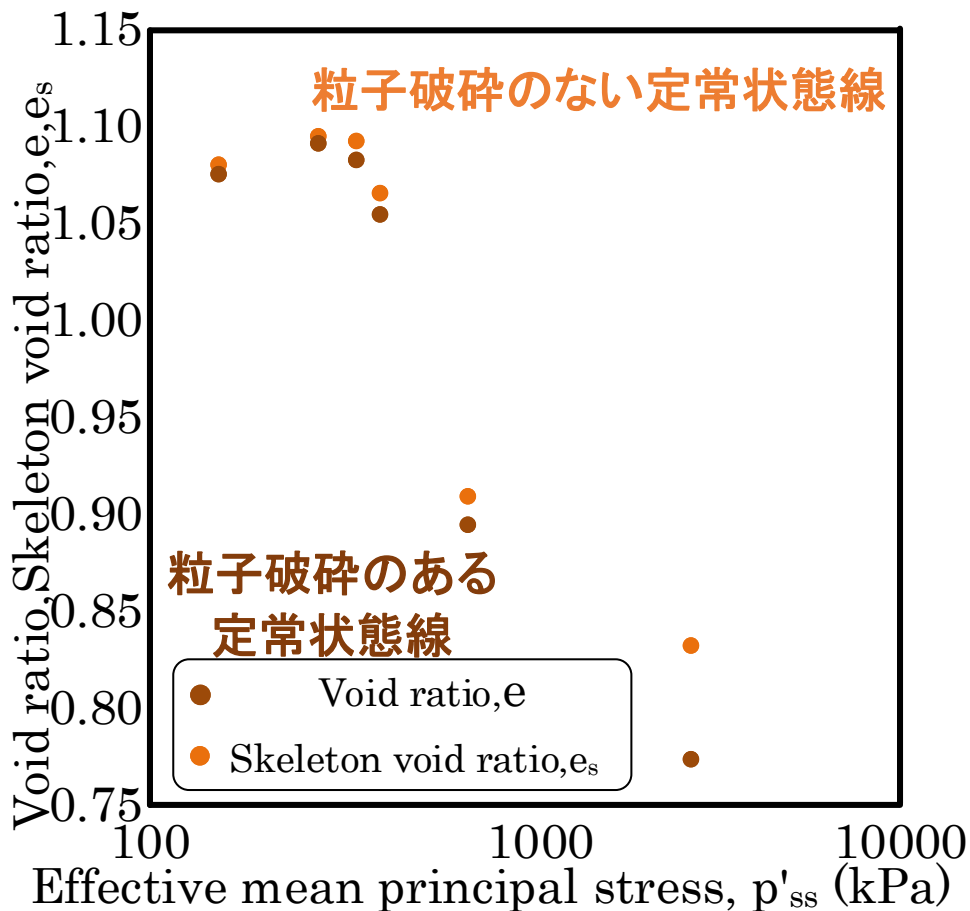


図 5.3.1 骨格間隙比を用いた 6 号岐阜砂の定常状態線の比較

第 6 章

構成則を用いた 砂の非排水挙動の予測

はじめに

排水条件では粒子破碎が砂の強度に与える影響は小さいが、非排水挙動に与える影響は大きいと考えられる。そこで、既往の定常状態モデルに基づく構成則を用いて、破碎がない場合に比べて破碎がある場合の非排水せん断抵抗の大きさを比較してみることにする。

Wang ら (2002) によって提案されている砂の構成則がある。これは「試験結果の定常状態線を $e = e_0 - \lambda_c(p/p_{at})^\xi$ のように定式化 (Li ら (1999)) することで砂の非排水せん断挙動を予想するものである。この考え方を応用し、骨格間隙比による定常状態線を同様に定式化することで、粒子破碎がない場合の砂の非排水せん断挙動を調べ、破碎の有無による砂の非排水せん断特性を調べる。

6.1 豊浦砂の限界状態モデル

6.1.1 豊浦砂のパラメータの決定方法

図 6.1.1.1 は豊浦砂の定常状態線の限界状態モデル $e = e_0 - \lambda_c(p/p_{at})^\xi$ である。

ここで、同様に骨格間隙比を用いた、粒子破碎の無い定常状態線を表すパラメータを推定する。 e_0 は $p=0\text{kPa}$ での間隙比であり破碎のある場合と同様とし、 λ_c については $p=100\text{kPa}$ の時 $\lambda_c = e_0 - e$ となる。ここで、 e_0 は破碎のある場合と同様であるから、 λ_c についても破碎のある場合と同様であるとした。

最後に ξ については、上式を $\ln((e_0 - e)/\lambda_c) = \xi \ln(p/p_{at})$ と変形することで、グラフの傾きから計算した。図 6.1.1.2 は豊浦砂のパラメータ ξ の決定方法である。

以上の結果から得られた、破碎しない定常状態線を図 6.1.1.3 に示した。

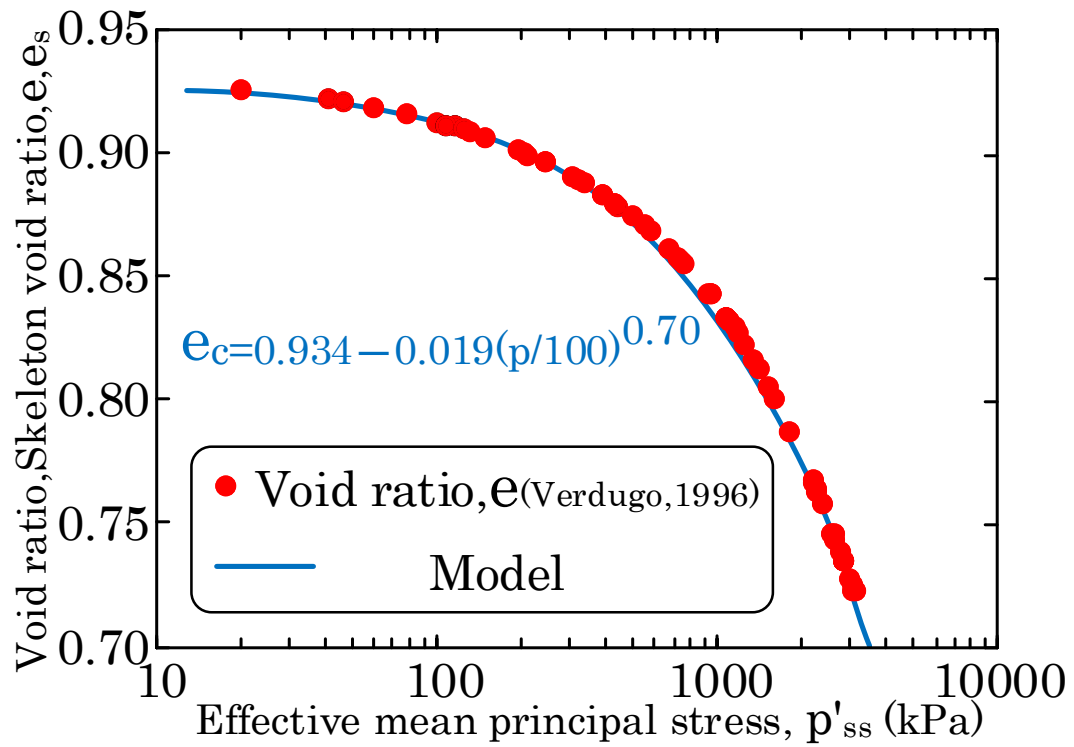


図 6. 1. 1. 1 豊浦砂の限界状態モデル

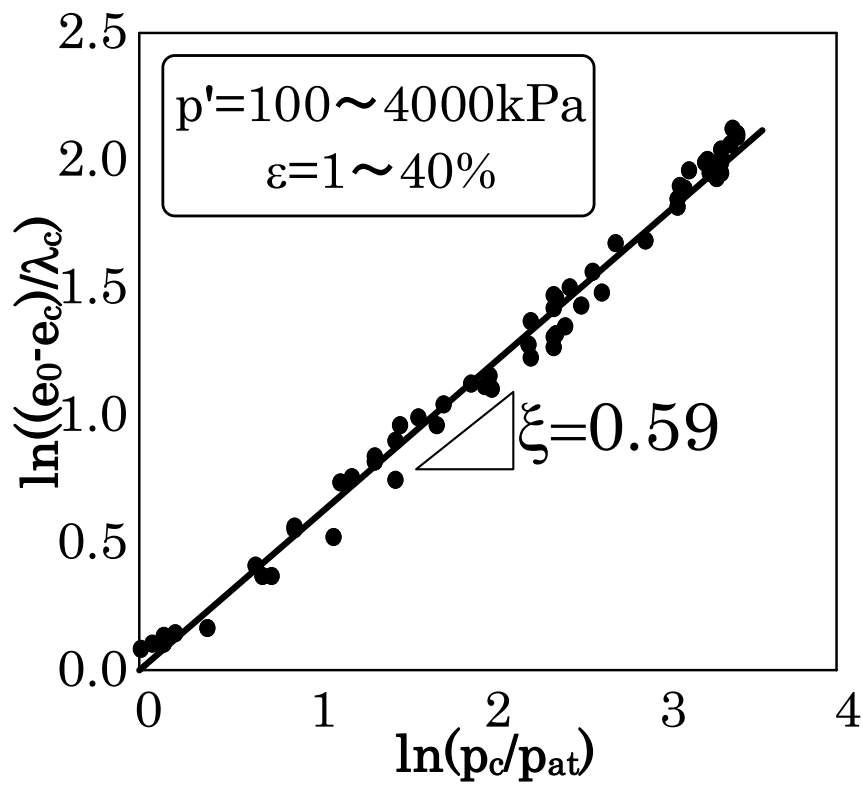


図 6. 1. 1. 2 骨格間隙比を用いた豊浦砂のパラメータ ξ の決定方法

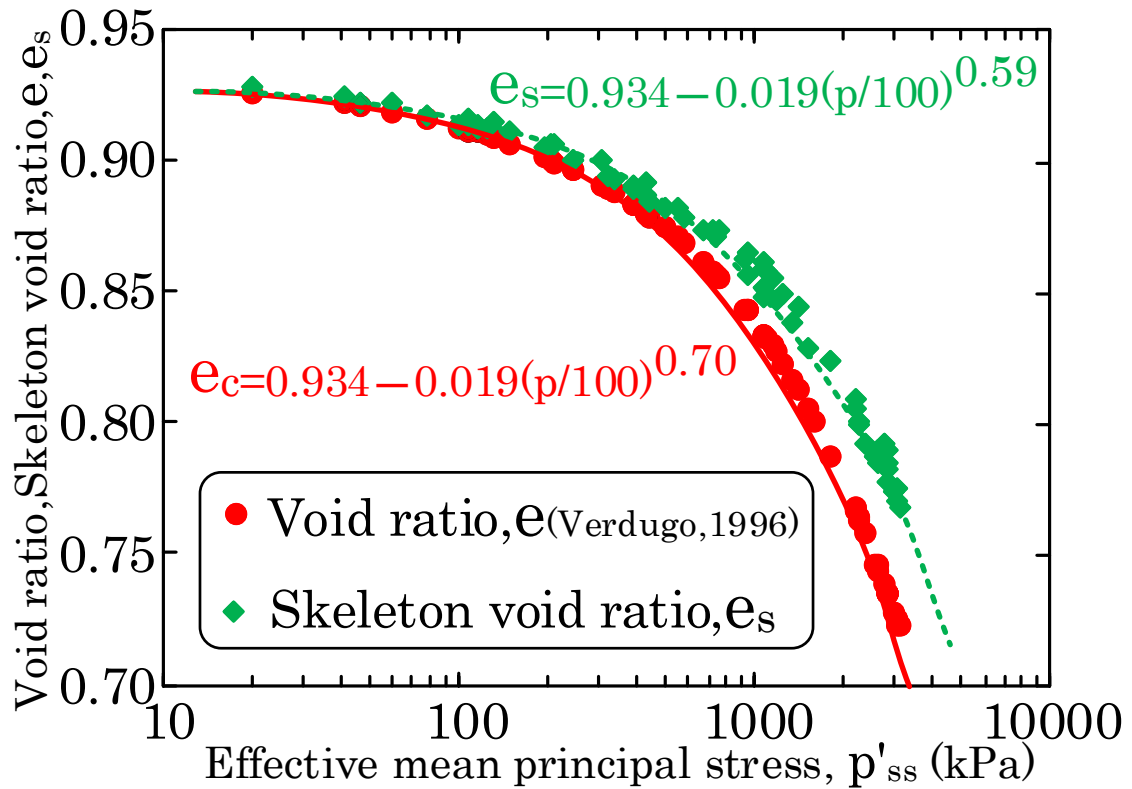


図 6. 1. 1. 3 破碎のある場合とない場合の豊浦砂の限界状態モデル

6. 2 飯豊砂の限界状態モデル

6. 2. 1 飯豊砂のパラメータの決定方法

飯豊砂の定常状態線を限界状態モデル $e = e_0 - \lambda_c(p/p_{at})^\xi$ で推定するためのパラメータの決定方法を以下に記す。

まず、 e_0 については定常状態線から目視で推定した。次に λ_c については豊浦砂と同様に $\lambda_c = e_0 - e$ から求め、 ξ は $\ln((e_0 - e)/\lambda_c) = \xi \ln(p/p_{at})$ のグラフの傾きから求める。図 6. 2. 1. 1～6. 2. 1. 4 はその結果である。

以上から計算した 4～7 号飯豊砂の限界状態モデルを図 6. 2. 1. 5～6. 2. 1. 8 に示す。

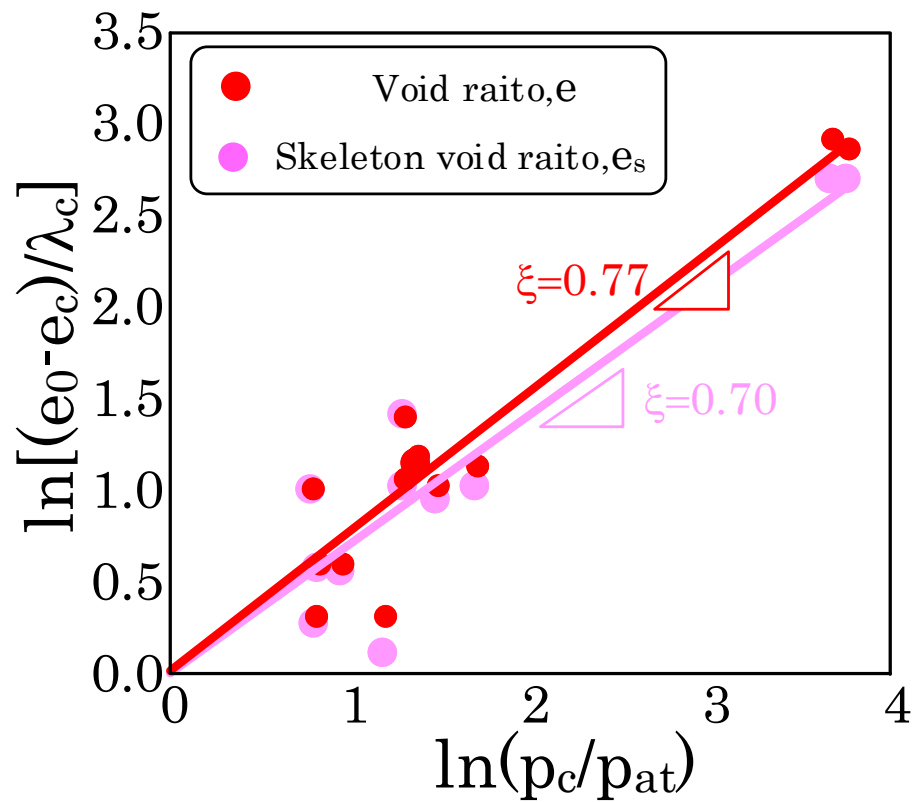


図 6. 2. 1. 1 骨格間隙比を用いた 7 号飯豊砂のパラメータ ξ の決定方法

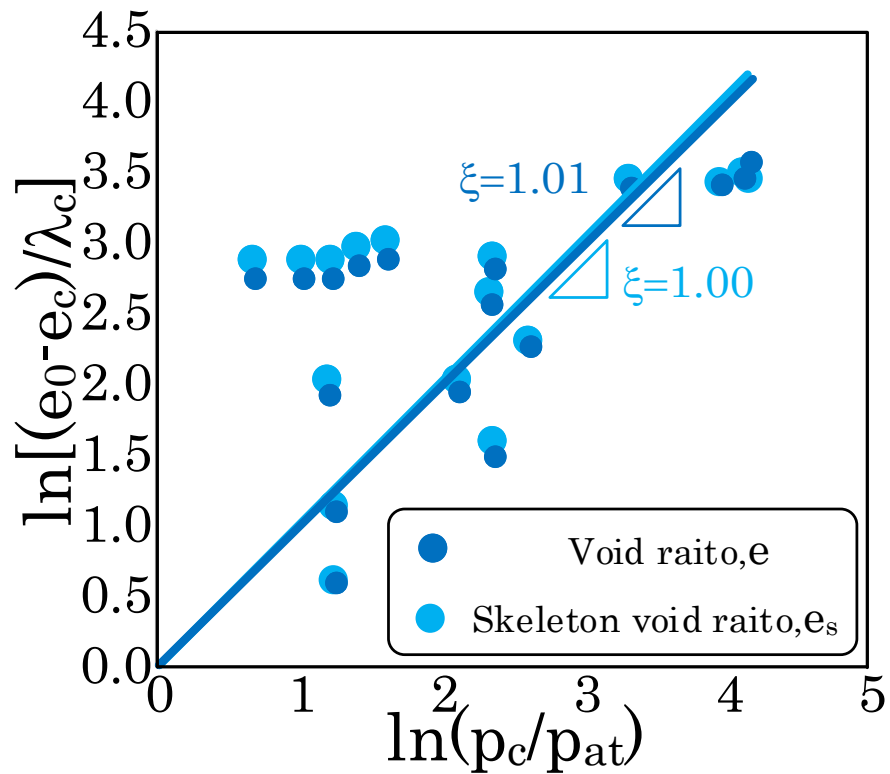


図 6. 2. 1. 2 骨格間隙比を用いた 6 号飯豊砂のパラメータ ξ の決定方法

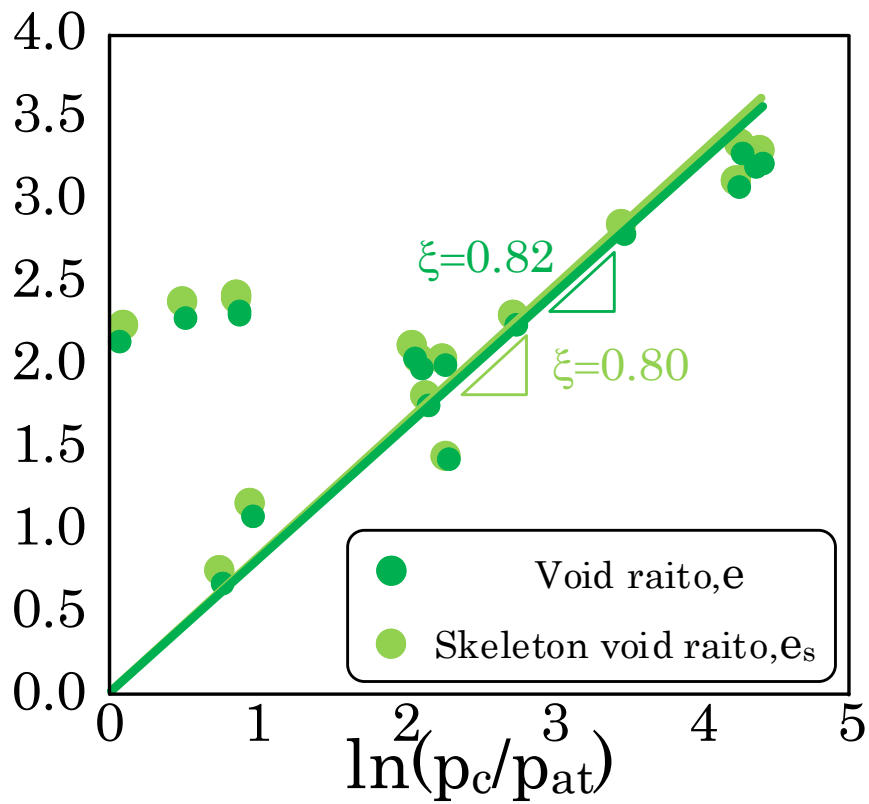


図 6. 2. 1. 3 骨格間隙比を用いた 5 号飯豊砂のパラメータ ξ の決定方法

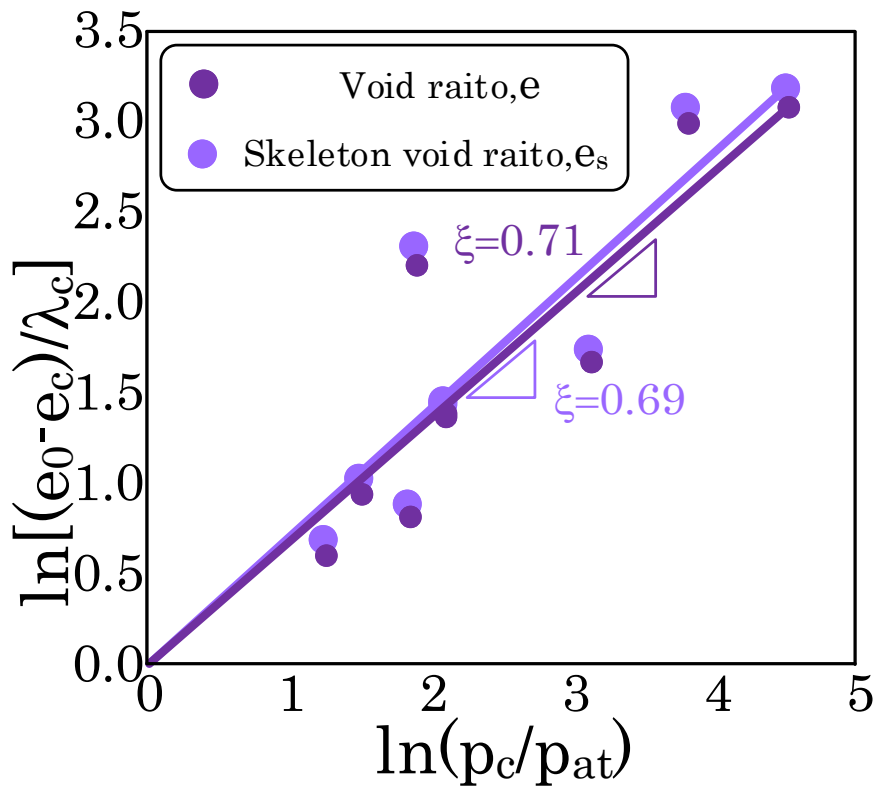


図 6. 2. 1. 4 骨格間隙比を用いた 4 号飯豊砂のパラメータ ξ の決定方法

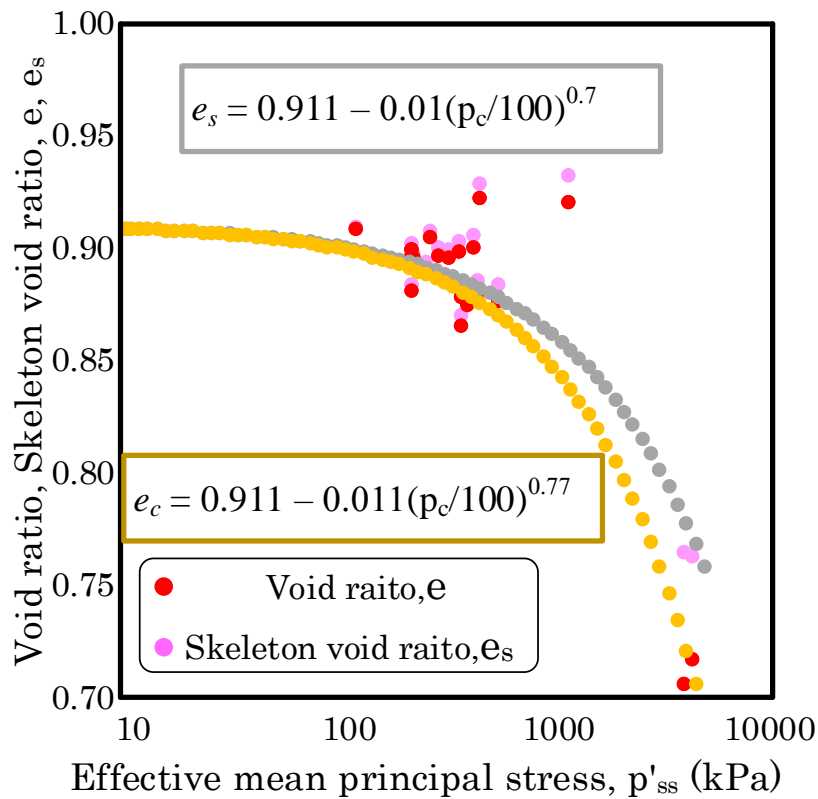


図 6. 2. 1. 5 破碎のある場合とない場合の 7 号飯豊砂の限界状態モデル

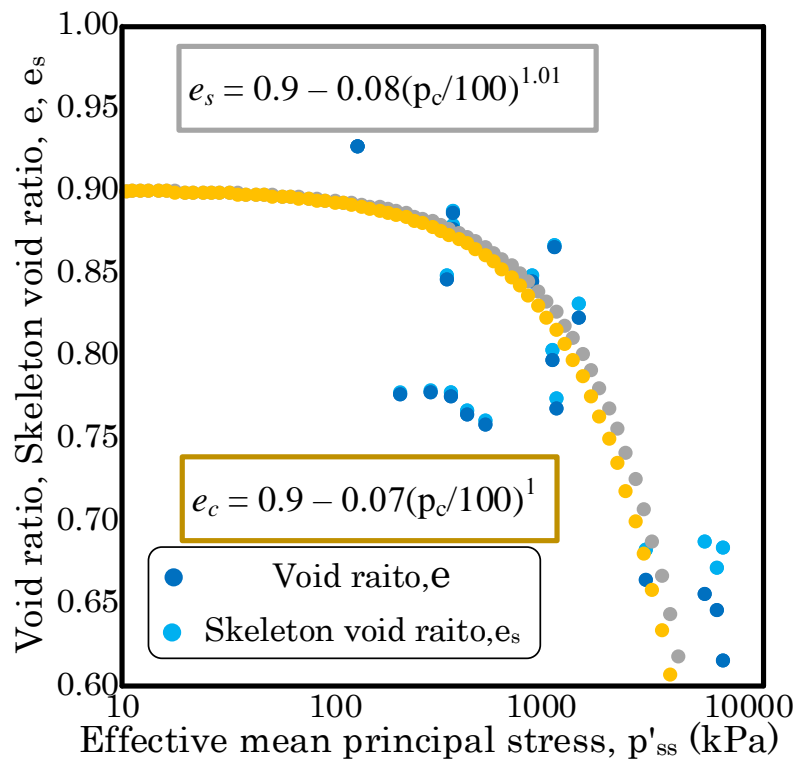


図 6. 2. 1. 6 破碎のある場合とない場合の 6 号飯豊砂の限界状態モデル

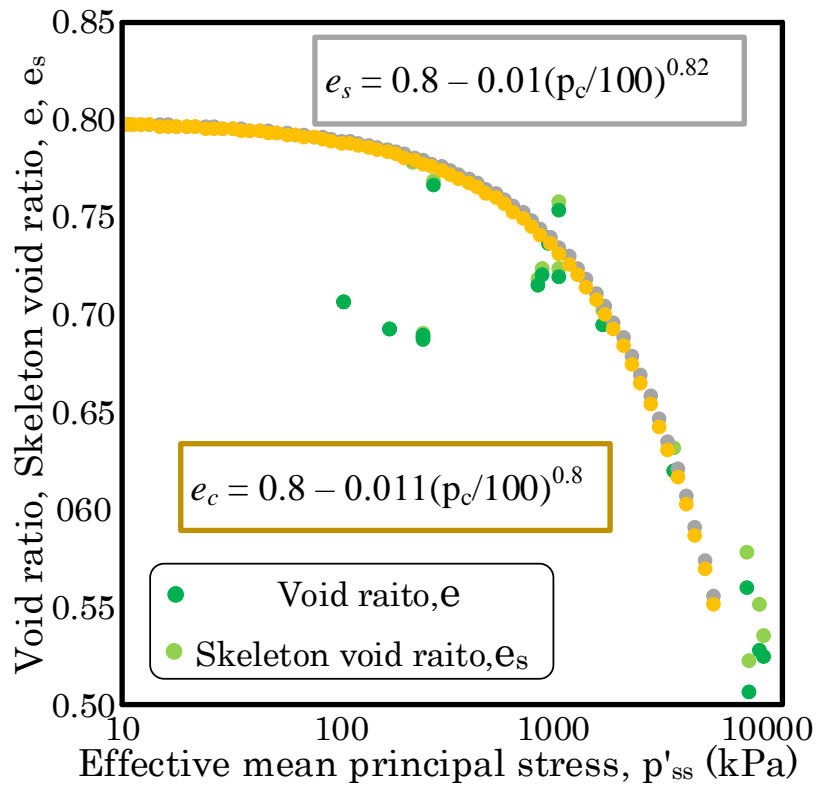


図 6.2.1.7 破碎のある場合とない場合の 5 号飯豊砂の限界状態モデル

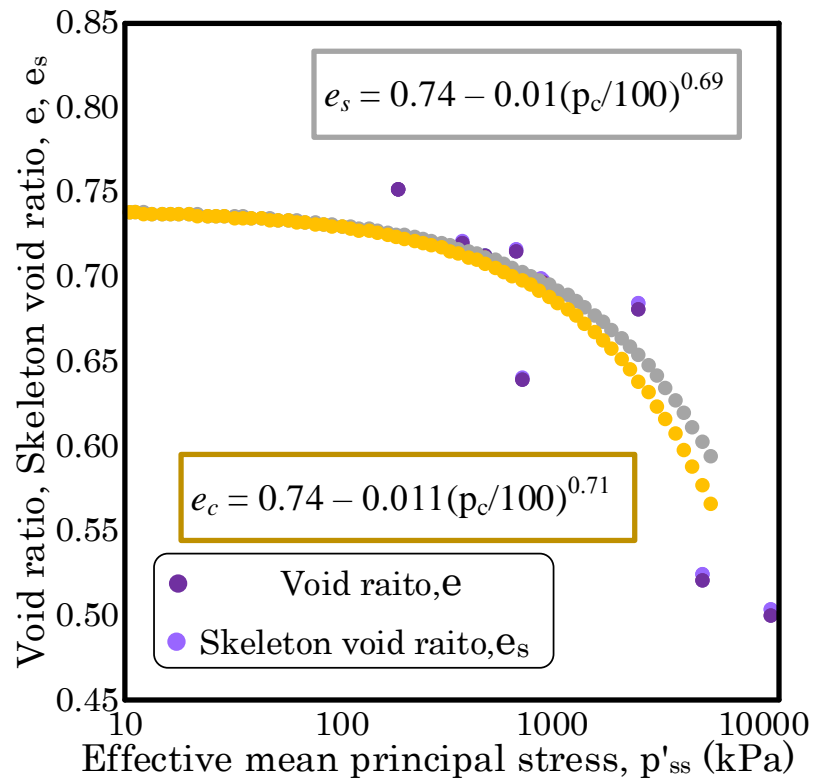


図 6.2.1.8 破碎のある場合とない場合の 4 号飯豊砂の限界状態モデル

ここで、図 6.2.1.6 および 6.2.1.7 を見ると、破碎のある定常状態線モデルと破碎の無いモデルの差があまりないことがわかる。これは、試験結果のばらつきが特に大きく、 e_0 や λ_c の設定がうまく機能していないことが考えられる。そこで、改めて定常状態線のパラメータを目視で推定し、新たに再提案した。

図 6.2.1.9 および 6.2.1.10 は再定義した 6 号砂 5 号砂の定常状態線の推定モデルである。

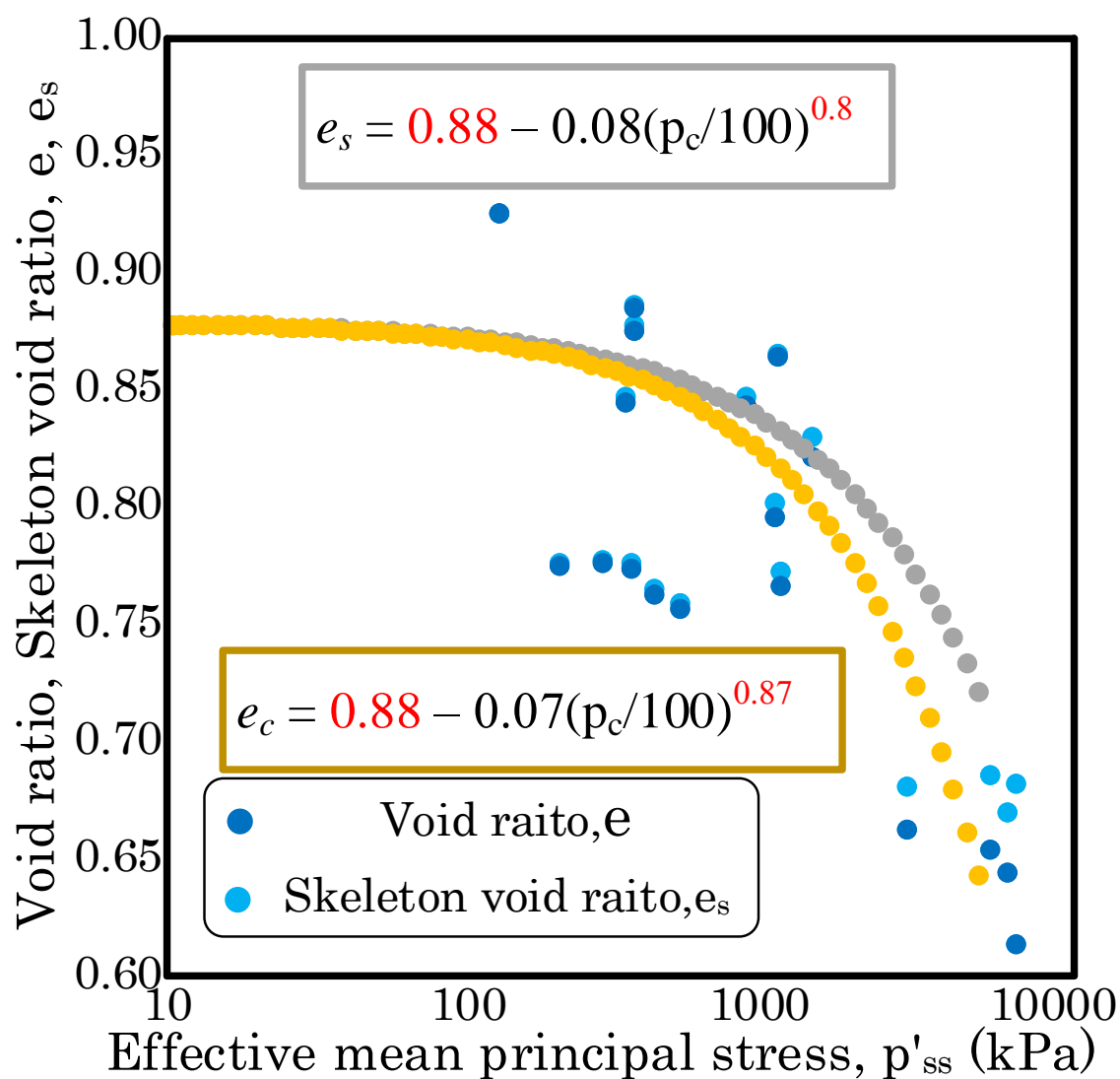


図 6.2.1.9 再提案した 6 号飯豊砂の限界状態モデル

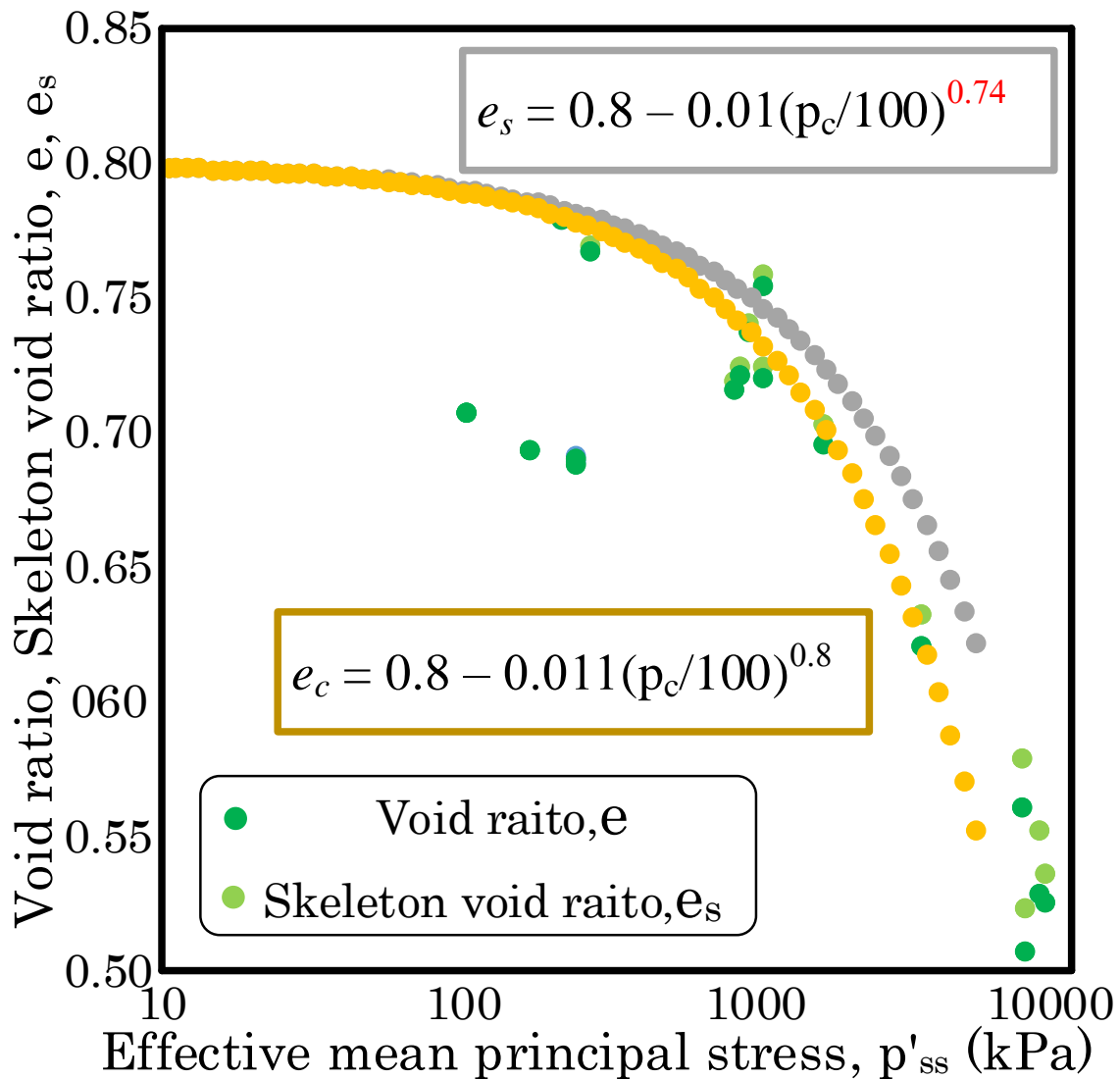


図 6. 2. 1. 10 再提案した 5 号飯豊砂の限界状態モデル

6. 2. 2 粒径の異なる砂の限界状態モデル

図 6. 2. 1. 11 は今回推定した 4～7 号飯豊砂の破碎のある場合とない場合の定常状態線である。6 号砂および 5 号砂については、再提案したものを採用してある。一般的に、砂の粒径が大きくなるほど間隙比はより密になることが知られておりグラフを見ると、おおむねその特徴を表しているが、一部が交差するなどうまく表せていない個所もある。これについては、元とした試験結果のばらつきの大きさや試験の試行回数不足等が挙げられる。また、骨格間隙比を用いた破碎性の評価については、粒径の違いを細粒分 FC のみで評価することの困難さもあり、定常状態線の比較からも粒径との相関を見つけることができないということが分かった。

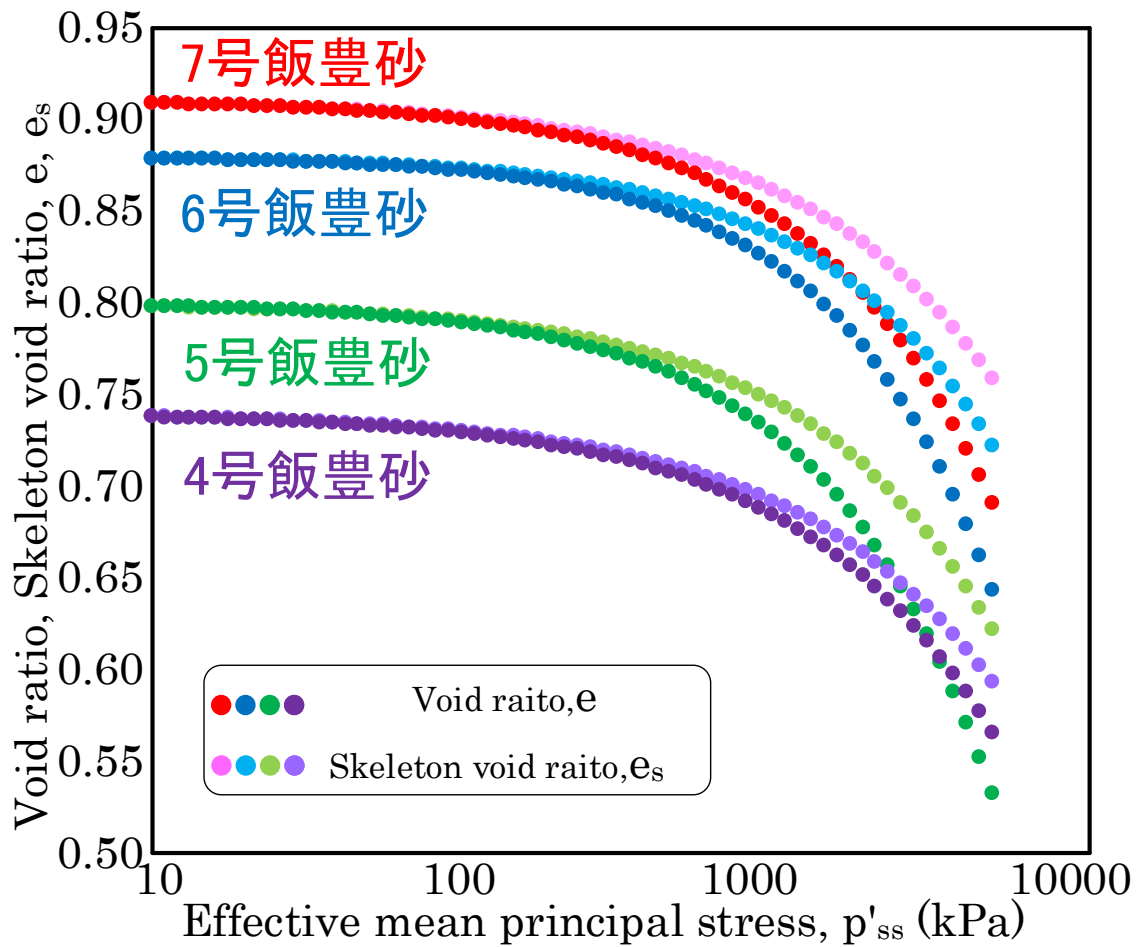


図 6. 2. 1. 11 再提案した 5 号飯豊砂の限界状態モデル

6. 3 岐阜砂の限界状態モデル

6. 3. 1 岐阜砂のパラメータの決定方法

岐阜砂の定常状態線を限界状態モデル $e = e_0 - \lambda_c(p/p_{at})^{\frac{1}{2}}$ で推定するためのパラメータを決定していく。豊浦砂や飯豊砂では e_0 については定常状態線から目視で推定する手法をとったが、岐阜砂の定常状態線についてはその傾きが両者よりも大きく同様の式での表現がより困難であると予想し、5, 6 号飯豊砂と同様に、試験結果の定常状態線に沿うようにパラメータを決定した。 e_0 に近い低圧部の定常状態のデータが得られればより正確な式設定が可能であると考えが、本研究で調べることのできた範囲で定常状態線を描いた。以下図 6. 3. 1 はその定常状態線である。

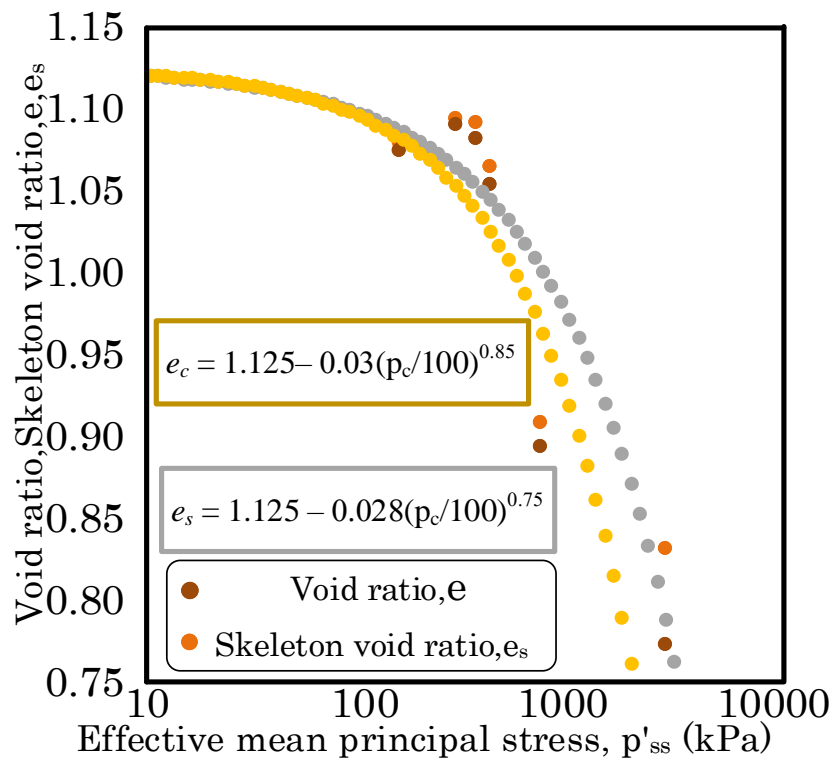


図 6. 3. 1 破碎のある場合とない場合の 6 号岐阜砂の限界状態モデル

6. 3. 2 粒子形状の異なる砂の限界状態モデル

図 6. 3. 2. 1 は 6 号岐阜砂と豊浦砂の限界状態モデルの比較図である、同じ拘束圧、特に高圧部にて比較すると、岐阜砂の骨格間隙比による定常状態線を推定した限界状態モデルと元の試験結果を推定した限界状態モデルの差の方が、豊浦砂の限界状態モデルの差より大きくなっていることがわかる。この結果は、岐阜砂の方が豊浦砂よりも破碎性が高いという第 4 章の結果とも一致する。

すなわち、破碎性が高い砂の方がせん断中の粒子破碎がより大きく発生し、強度の低下が著しいということが示された。

また今回の試験結果では破碎性 (B_w パラメータ) の違いが 1.5 倍程度であったが、より明確に破碎性の違いを調べるためには、10 倍や 20 倍異なる砂を使用する必要がある。そのような材料があれば、ぜひ試してみたい。

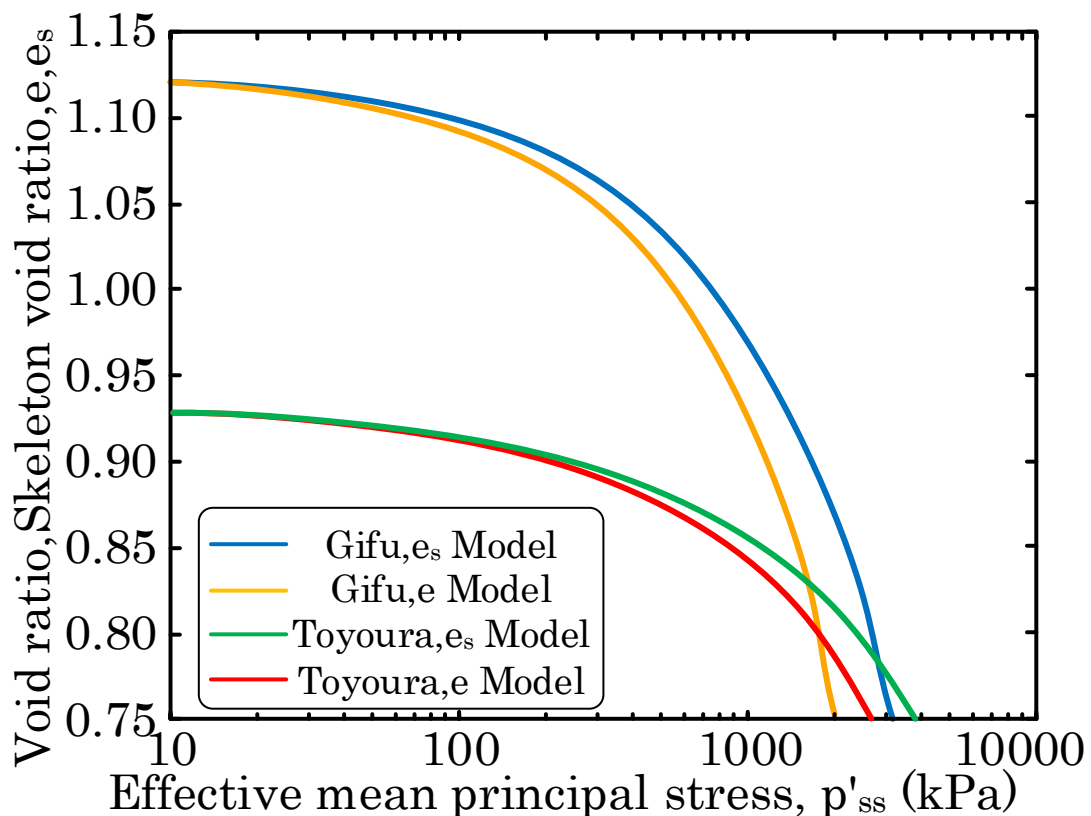


図 6.3.2 6号岐阜砂と豊浦砂の限界状態モデルの比較

6.4 粒子破碎の有無による豊浦砂の非排水強度へ影響

ここまでの研究では、粒子破碎がせん断中に生じることで定常状態での強度が低下することが定量的に明らかにされているが、粒子破碎がせん断中の非排水強度にどのような影響を与えるのかはわかっていない、そこで6.1より推定した豊浦砂の破碎の無い定常状態線を推定した限界状態モデルを用いて、既存の構成則を用いた粒子破碎のせん断中の挙動を予測する。

Wang ら (2002) によって提案されている砂の構成則の一部を改変し破碎の無い場合の豊浦砂の挙動を調べる。

まず元の構成則において、間隙比 e であらわされているパラメータを骨格間隙比 e_s に置き換える。

以下置き換えたパラメータの式と表 6.4.1 には破碎の無い豊浦砂の定常状態線パラメータを記した。

式 (3) より

$$G = G_0 p_a \frac{(2.973 - e_s)^2}{1 + e_s} \sqrt{\frac{p}{p_a}} \quad (9)$$

式 (8) より

$$p_c = p_a \left(\frac{e_0 - e_s}{\lambda_s} \right)^{\frac{1}{\xi}} \quad (10)$$

表 6. 4. 1 破碎の無い豊浦砂の定常状態線パラメータ

e_0	λ_s	p_a	ξ
0.934	0.019	100	0.59

以上、新たにパラメータを置き換えた破碎の無い豊浦砂の構成則（式 (1) (2)）を用いて拘束圧や間隙比等の初期条件を様々変えた応力ひずみ曲線および応力経路図を描き、破碎のある場合の豊浦砂と比較した。図 6. 4. 1～6. 4. 6 は粒子破碎のある場合とない場合の応力ひずみ曲線および応力経路図の比較である。

以上のグラフから、粒子破碎による細粒分の増加はせん断の終局状態である定常状態強度だけでなく、せん断中の非排水挙動にも影響し強度の低下を引き起こしていることが示された。

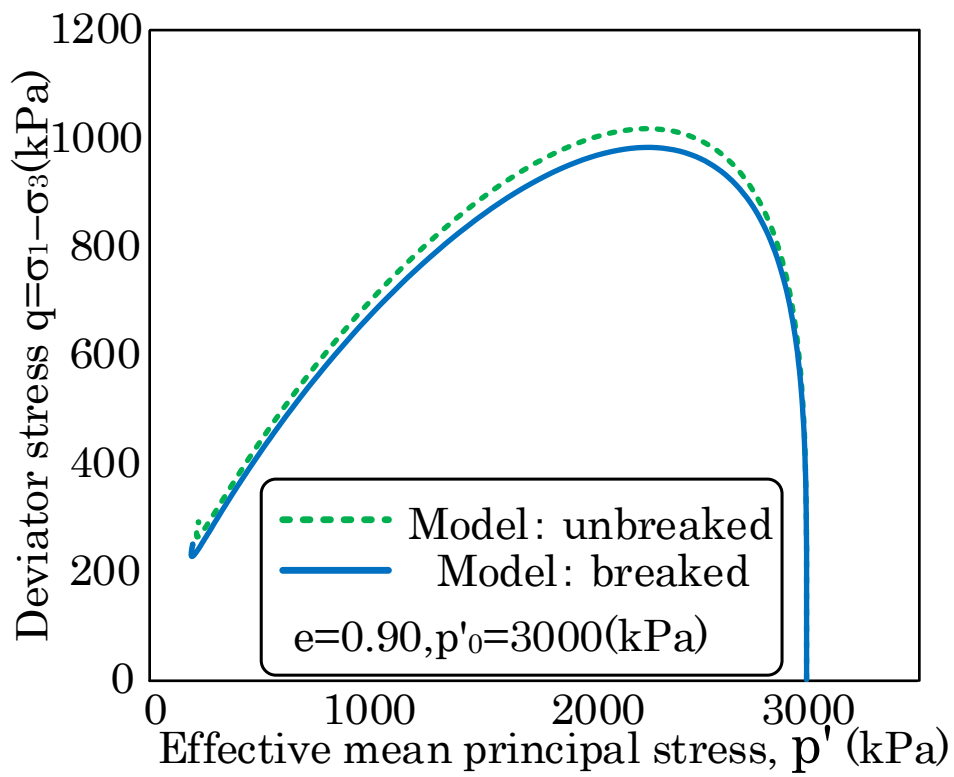
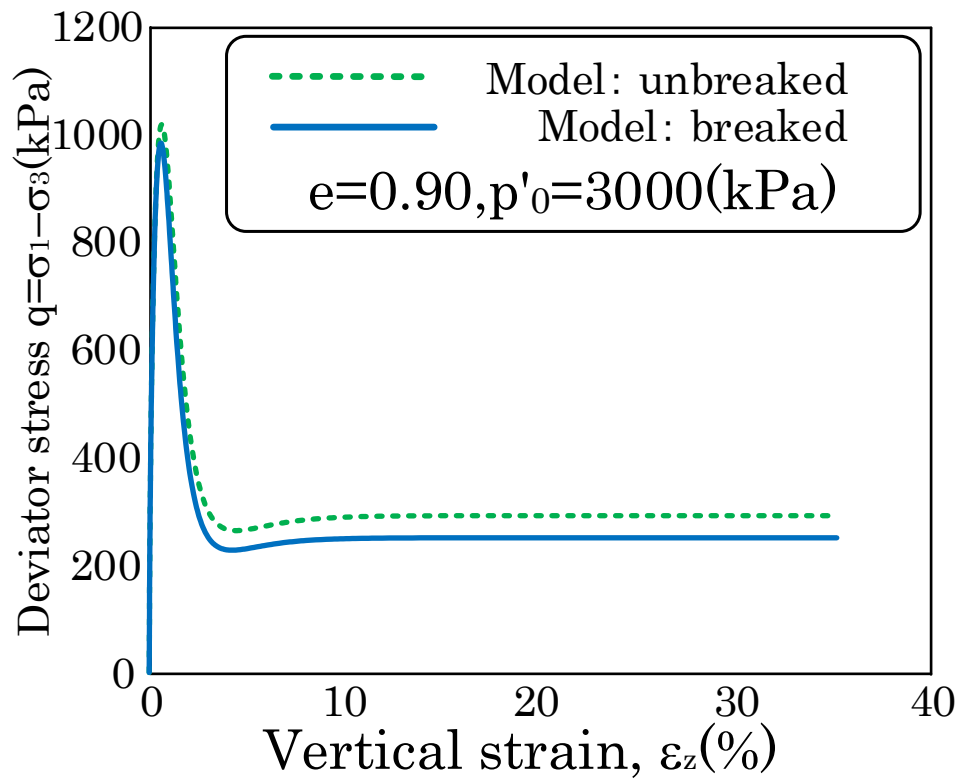


図 6. 4. 1 $e_0 = 0.90, p'_0 = 3000$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

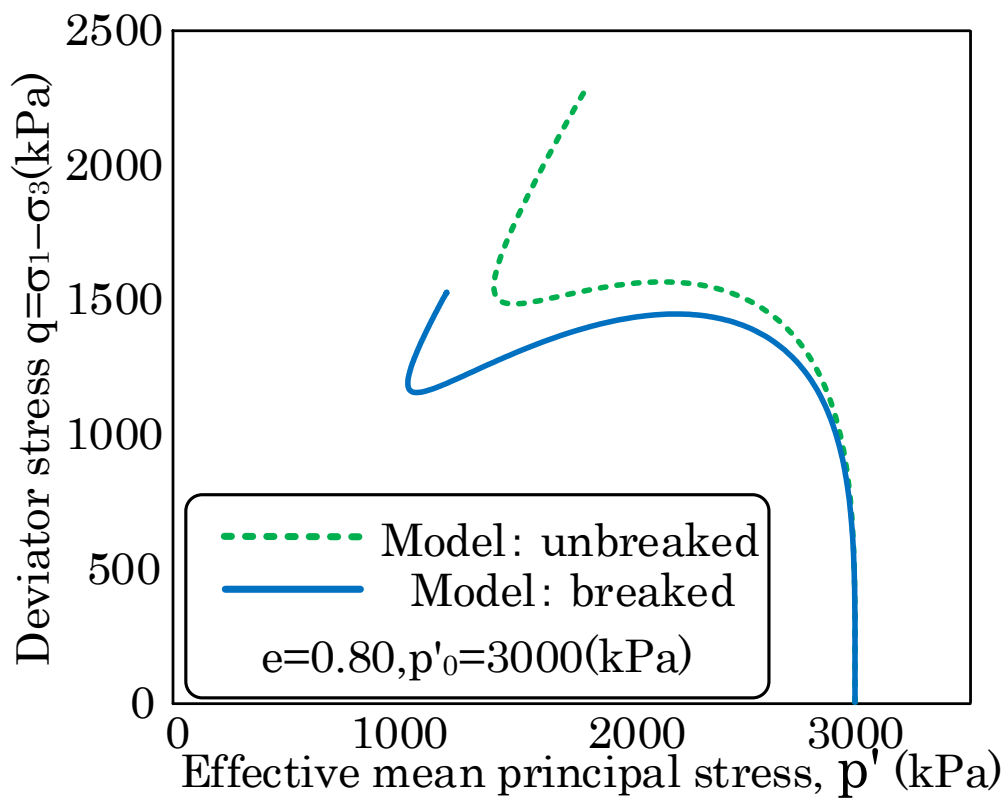
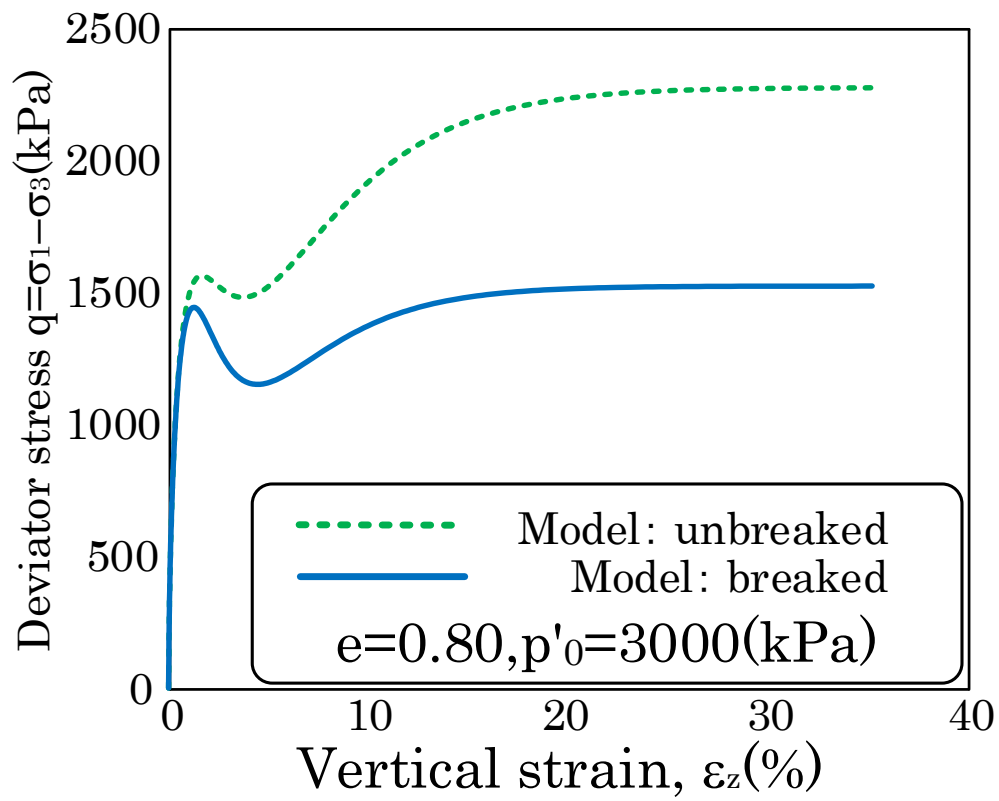


図 6. 4. 2 $e_0 = 0.80, p'_0 = 3000$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

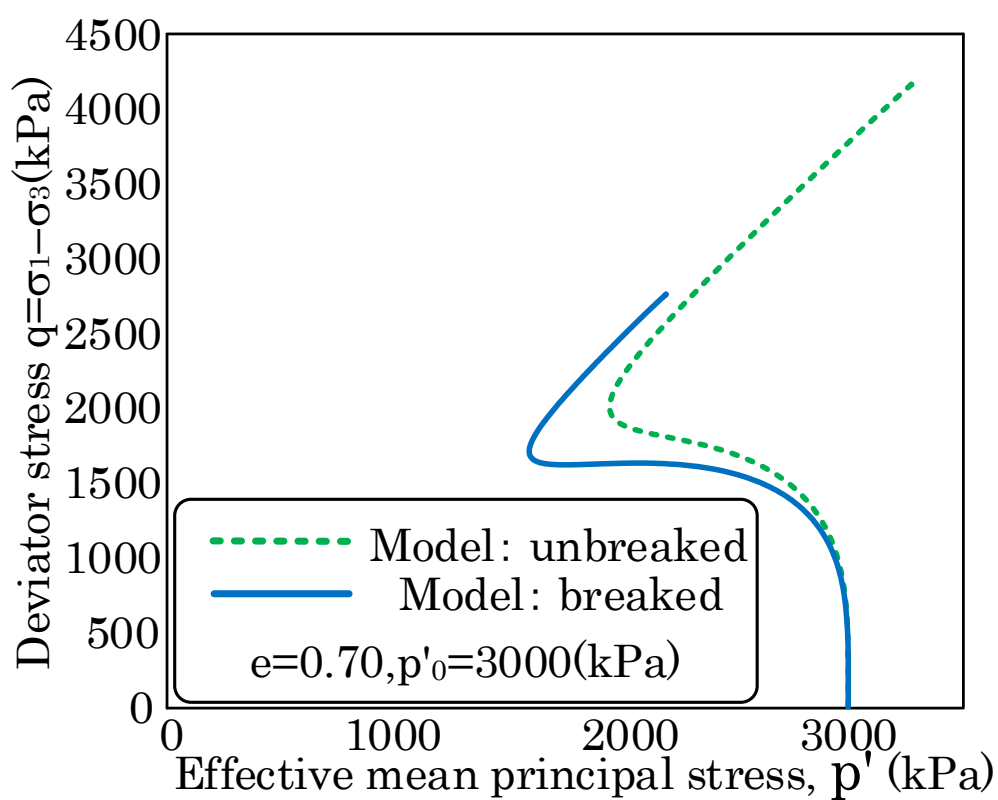
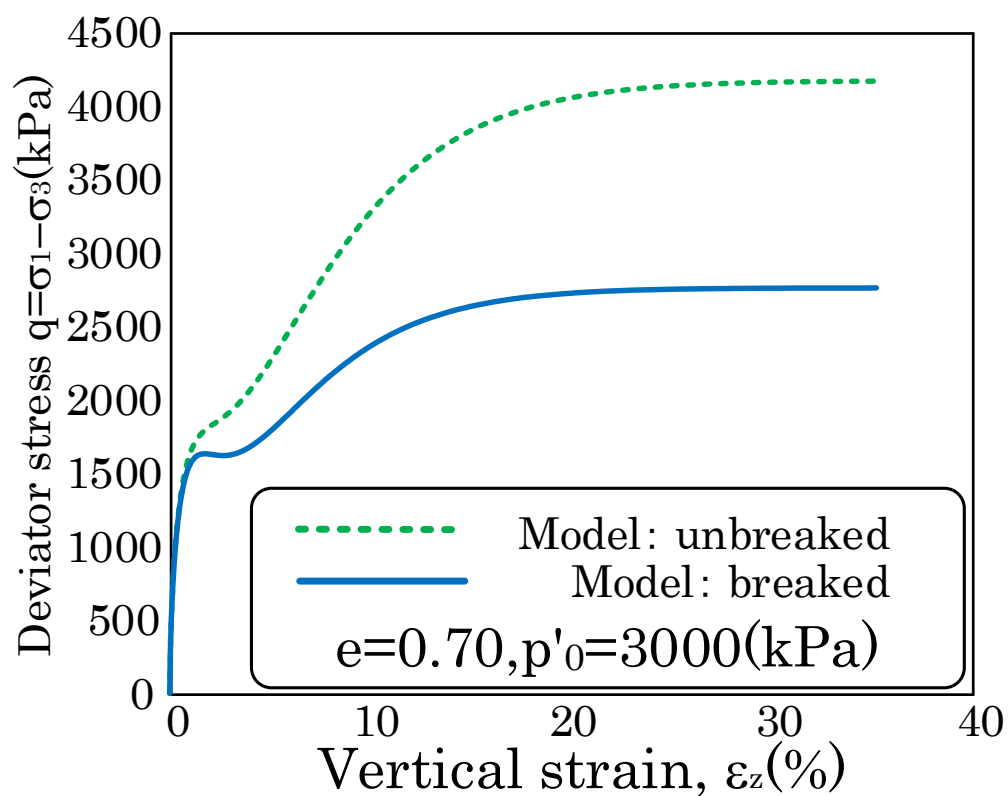


図 6. 4. 3 $e_0 = 0.70, p'_0 = 3000$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

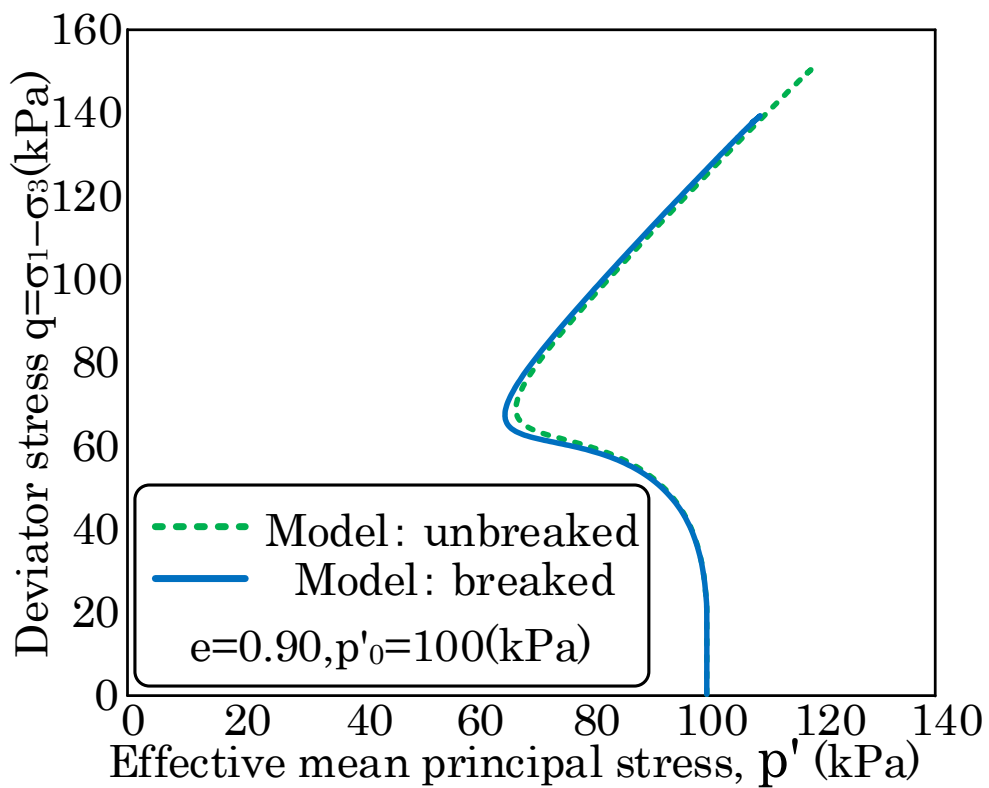
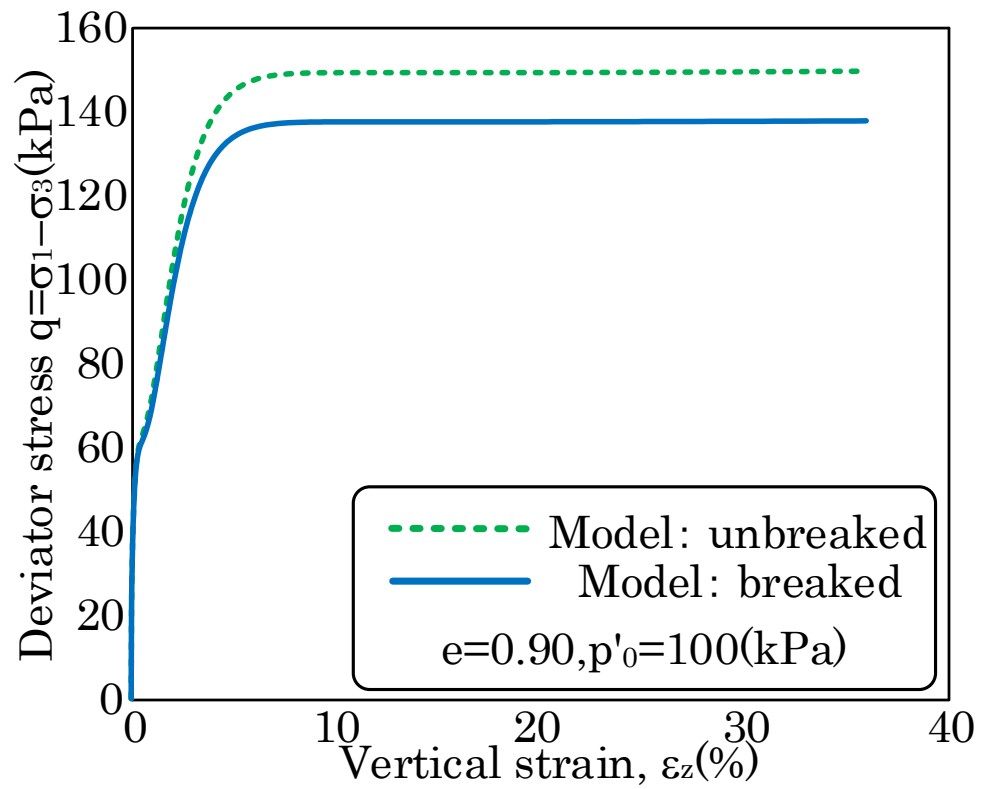


図 6. 4. 4 $e_0 = 0.90, p'_0 = 100$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

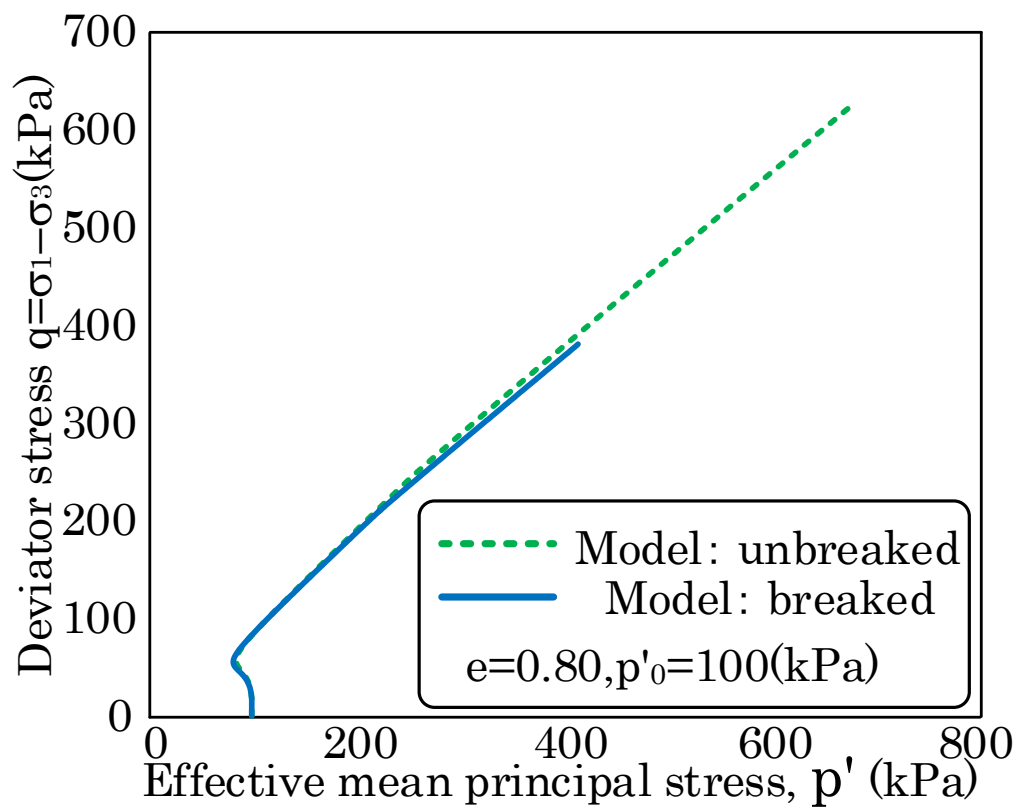
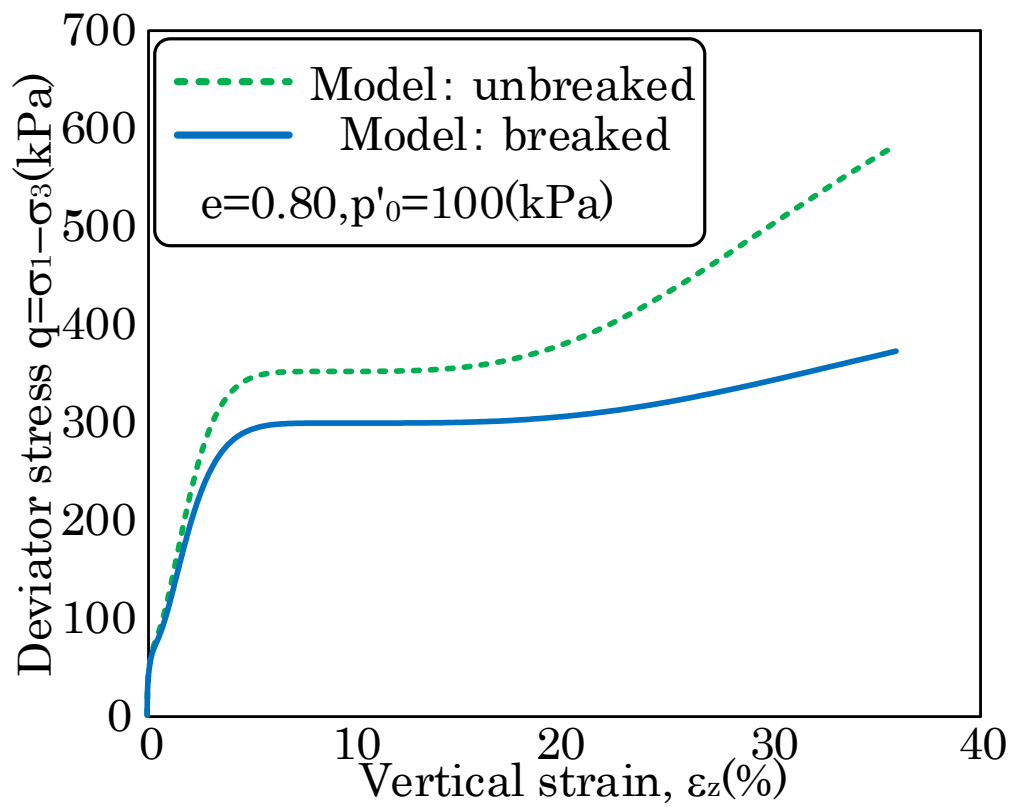


図 6. 4. 5 $e_0 = 0.80, p'_0 = 100$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

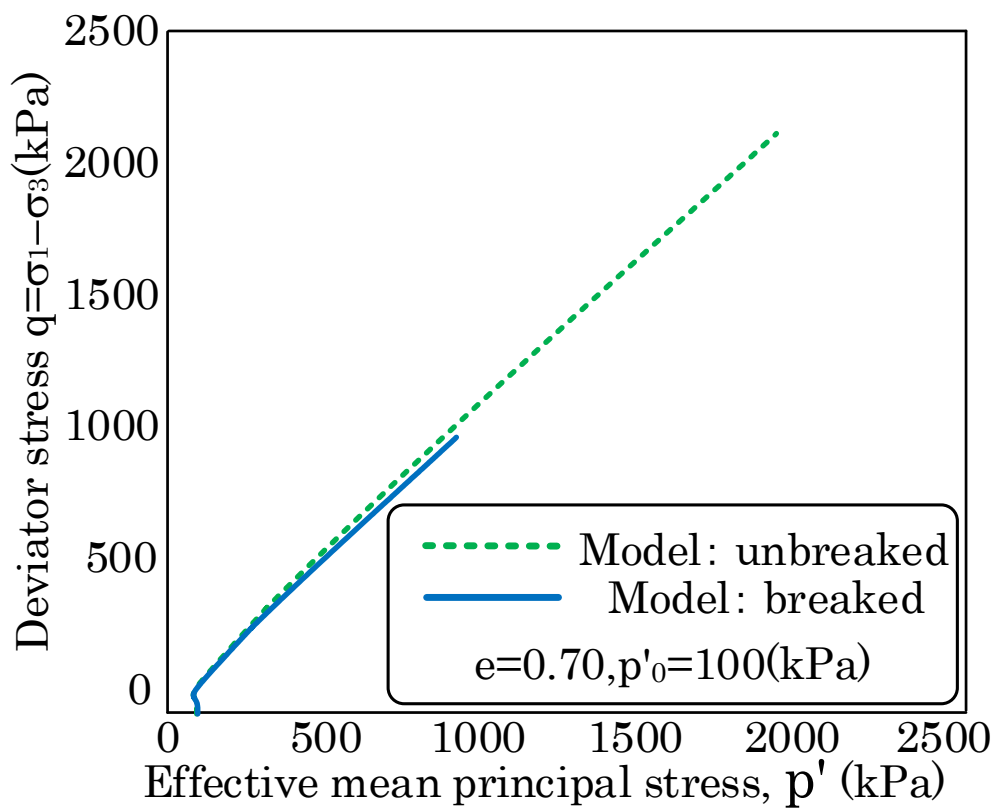
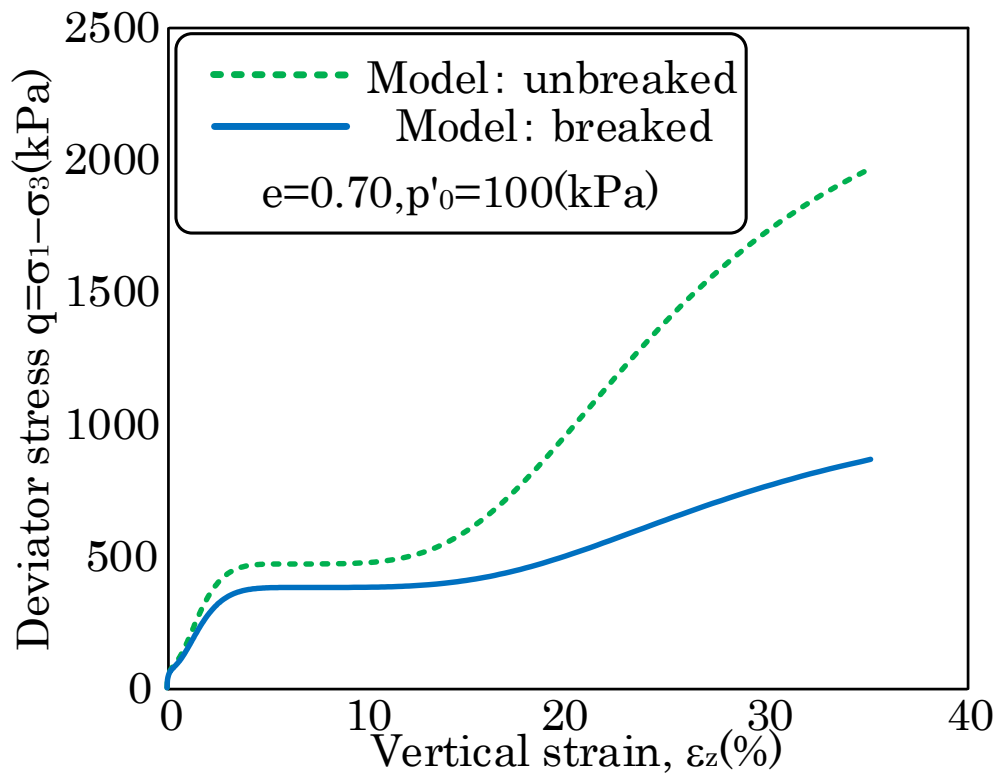


図 6. 4. 6 $e_0 = 0.70, p'_0 = 100$ kPa での豊浦砂の
粒子破碎の有無による非排水挙動の違い

第 7 章

結論

結論

砂の粒子破碎現象とは、地盤中の砂がせん断時など大きな力を受けると、砂粒子自体が破碎を起こす現象である。破碎の結果、砂粒子の粒径や粒子の形状が変化することによって、その砂本来の物性値がせん断中に変化し、様々な物理現象に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、粒子破碎が非排水せん断強度に与える影響について調べた。

まず排水三軸圧縮せん断試験を行い、様々な拘束圧条件とひずみ条件のもとで、せん断中の粒子破碎による細粒分発生 of 仕組みを明らかにするために、これらのせん断条件と粒子破碎によって発生する細粒分含有率 FC の相関を調べた。その結果、以下のことが分かった。

- ・細粒分含有率 FC は、三軸圧縮せん断における鉛直方向の変形に関する単位体積当たりの仕事（鉛直ひずみ ε_z と鉛直応力 σ'_z の積）と線形関係にあり、比例係数を B_w とすると $FC = B_w W$ という式で表すことが可能であることが示された。
- ・粒径はほぼ同一で粒子の形状が異なる岐阜砂と豊浦砂の破碎性を比較した結果、粒子形状が角張っている方が破碎性は大きくなることが示された。
- ・粒子の形状が似ており、平均粒径の異なる 4 種類の飯豊砂の破碎性をそれぞれ比較した結果からは粒径が大きくなるほど破碎性は小さくなることが示された。しかし、これは破碎前の粒径に関わらず $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分の発生量で破碎性を評価するという条件による違いであると考えられるため、細粒分含有率 FC のみを用いた評価方法では粒径の違いによる破碎性を表現するには不十分であるといえる。
- ・単調載荷試験の結果から得られた相関 $FC = B_w W$ が繰り返し載荷試験でも成立するかどうかを調べた結果、せん断仕事 W と FC 発生量の相関が載荷過程と除荷過程で異なるため、単調載荷試験と同様の関係式で表現をすることは困難であることが示された。

以上の試験結果を鑑みて、せん断中に粒子破碎によって発生した細粒分が砂の定常状態（間隙比 e と有効拘束圧 p の相関）に与えるの影響を、骨格間隙比 e_s を用いることによって以下のように表現することを試みた。

- ・骨格間隙比 e_s によってあらわされた定常状態線の方が試験結果の間隙比 e によってあらわされた定常状態線よりも全体的に上部に位置し、特に 1000kPa より大きい拘束圧帯では骨格間隙比 e_s が間隙比 e に比べて大きくなっていることが示された。
- ・せん断中に全く粒子破碎しないとすれば常に $FC = 0$ であり、定常状態も含めて常に $e_s = e$ となるので、骨格間隙比 e_s を用いた定常状態線は砂が全く粒子破碎しなかった場合の定常状態線であると言える。
- ・粒子破碎の無い場合の豊浦砂の定常状態線は $e_s = 0.914 - 0.019(p/100)^{0.59}$ のように定式化された。

最後に、粒子破碎のある定常状態線と粒子破碎の無い定常状態線を既往の砂の構成則に適用して粒子破碎の有無による砂の非排水挙動の違いをシミュレーションした結果、以下のことが分かった。

- ・せん断中に粒子破碎が生じる影響により、砂の非排水せん断変形中のせん断抵抗や定常状態での強度は破碎がない場合よりも低下することが確かめられた。
- ・砂の間隙比が小さくて密な場合ほど強度さが大きく、間隙比が大きくて緩い場合には強度の差は小さくなることが示された。

今回の試験では、定常状態線の傾きが小さい豊浦砂を主に扱ったが破碎性が大きくなると定常状態線の傾きは大きくなるため、そのような条件の砂でも本研究の手法を用いることで同様の解析が可能かどうかは確認の余地があるといえる。

また、今回の細粒分含有率 FC を用いた粒子破碎の評価方法は、粒径の異なる砂の比較には適さないことも明らかになっているため、ほかの適した方法の提案が今後の課題となってくる。

参考文献

1. Bandini V, Coop R, The influence of particle breakage on the location of the critical state line of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No.4, pp.591-600, 2011.
2. Dafalias YF, and Manzari MT, Simple plasticity sand model accounting for fabric change effect, *Journal of engineering mechanics*, Vol.130, issue6, pp622-634, 2004.
3. Li XS, Dafalias YF, and, Wang ZL, State-dependent dilatancy in critical-state constitutive modelling of sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, issue4, pp599-611, 1999.
4. Thevanayagam, Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, issue6, pp.479-491, 1998.
5. Wang ZL, Dafalias YF, ShenB CK, Bounding surface hypoplasticity model for sand, *Journal of engineering mechanics*, Vol.116, issue 5, 1990.
6. Wang ZL, Dafalias YF, State pressure index for modelling sand behavior, *Journal of engineering mechanics*, ASCE, Vol.128, issue6, pp.511-519, 2002.
7. Verdugo, R. and Ishihara, K, The steady state of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 2, pp. 81-92, 1996.
8. 廣田祥, 吉嶺充俊, 繰り返しせん断による砂の粒子破碎, 首都大学東京卒業論文, 2017.
9. 黄千紋, 吉嶺充俊, Particle breakage in granular materials observed by laboratory test, 第50回地盤工学研究発表会, pp.61-62, 2015.
10. 山田優莉, 吉嶺充俊, 平均粒形の異なる4種類の飯豊珪砂の非排水せん断特性, 首都大学東京卒業論文, 2019.
11. 山村彩恵, 吉嶺充俊, 粒径幅の異なる飯豊珪砂の非排水せん断特性, 首都大学東京卒業論文, 2019.

謝辞

本論文は、指導教官である吉嶺先生のご指導のもと 2017 年 4 月から 2019 年 1 月までの研究成果をまとめた論文となります。大学院に進学し、研究テーマを見直し学部とは異なる方向で研究を行いましたが、M1 のころはなかなかうまくいかず、思うように成果が上がらない日々でした、M2 となり修論作成へ向け研究を続けたころにようやく方向が見え、このように修論の完成まで辿り着きました。B4 のころとは違い文献調査や、実験の実施、方針の決定など大部分を一人で考えて行うことはとても大変で思うようにいかずに時間を無駄にってしまうことも多々あり自分一人で研究をすることの難しさを痛感しました。方針で躓く度、先生に相談するとの確なアドバイスを頂くことができ大変勉強になりました。また普段のゼミ活動や雑談にて先生から様々なことを学ばせていただきました。今後の人生において土質研究室での 3 年間は、かけがえのないものとなると思っています。

また、小田先生には、様々な観点からアドバイスをいただき、研究に多様な視点を持つことができたと考えています。事務の福原さんには、研究室の管理や事務手続きなどをスムーズにさせていただき、研究を円滑に進めることができました。後輩の山田さん、山村さん、同期の汪さんには実験データの提供をしていただきとても有益でした。その他、在籍中に活動を共にしたゼミのメンバーや探査研究室のメンバーとのかかわりは得るものが多かったと感じています。

ここに、私が土質研究室での 3 年間の研究生活に関わったすべての人とモノに感謝の意を示したいと思います。ありがとうございました。

2019, 01, 31 水野光揮